



Armin Grasnick

# Grundlagen der virtuellen Realität

Von der Entdeckung der  
Perspektive bis zur VR-Brille

**EXTRAS ONLINE**

 Springer Vieweg



# Grundlagen der virtuellen Realität

---

Armin Grasnick

# Grundlagen der virtuellen Realität

Von der Entdeckung der Perspektive bis  
zur VR-Brille

Dr. Armin Grasnack  
Moos-Bankholzen  
Baden-Württemberg, Deutschland

ISBN 978-3-662-60784-8      ISBN 978-3-662-60785-5 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-60785-5>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Martin Boerger

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

*Gewidmet meiner geliebten Frau Annett, ohne die  
dieses Buch keinen Anfang genommen und auch  
kein Ende gefunden hätte.*

---

# Vorwort

## Perspektiven aus der Sicht von Riesen

Es scheint ein Grundbedürfnis des modernen Marketings zu sein, jegliche Weiterentwicklung mit dem Etikett der Innovation zu versehen. Innovation wird beständig ganz selbstverständlich mit Erfindung gleichgesetzt. Dabei wird dieser Begriff in seiner ursprünglichen Bedeutung (im Sinne des Ökonomen Schumpeter) deutlich allgemeiner verwendet (aus [1], S. 91)

„Technologische Veränderungen in der Produktion von Gütern, die schon auf dem Markt sind, die Erschließung neuer Märkte oder neuer Hilfsquellen, Taylorisierung der Arbeit, verbesserte Materialbehandlung, die Einrichtung neuer Geschäftsorganisationen wie etwa von Warenhäusern — kurz, jedes „Andersmachen“ im Gesamtbereich des Wirtschaftslebens —, das alles sind Beispiele dessen, was wir Innovation nennen wollen.“

Da aber Innovation nicht zwangsläufig Erfindung bedeutet<sup>1</sup>, sondern lediglich irgendeine Veränderung beschreibt und überdies mittlerweile etwas angestaubt anmutet<sup>2</sup>, ist der Hinweis auf eine Innovation längst nicht mehr ausreichend, um die Konsumenten zum Kauf zu motivieren. Also müssen größere Kaliber her. Um die absolute Neuheit eines Produktes anzupreisen bedient man sich deshalb gern der „Weltneuheit“. Wer es etwas martialischer mag, kündigt gar eine „Revolution“ an. Marx hatte schon in seinem „Kapital“ die revolutionäre Idee<sup>3</sup> des

---

<sup>1</sup>Schumpeter verwendet den Begriff der Innovation losgelöst von dem Begriff der Erfindung: „Innovation ist möglich ohne irgendeine Tätigkeit, die sich als Erfindung bezeichnen läßt, und Erfindung löst nicht notwendig Innovation aus, sondern bringt, für sich, ..., keine wirtschaftlich bedeutungsvolle Wirkung hervor.“ (aus [1] S. 91) s. a. [2].

<sup>2</sup>Immerhin verwendete ihn Schumpeter bereits seit den 30er Jahren des vorigen Jahrhunderts in seiner „Theory of Innovations“ (in [3], S. 87 ff.).

<sup>3</sup>Deutlich revolutionärer als „Das Kapital“ ist das „Manifest der Kommunistischen Partei“. Es gipfelt in der Aussage: „Sie [die Kommunisten] erklären es offen, dass ihre Zwecke nur erreicht werden können durch den gewaltsamen Umsturz aller bisherigen Gesellschaftsordnung. Mögen die herrschenden Klassen vor einer Kommunistischen Revolution zittern. Die Proletarier haben nichts zu verlieren, als ihre Ketten. Sie haben eine Welt zu gewinnen.“ (aus [4], S. 23).

grundsätzlichen Verfalls von Profiten<sup>4</sup> proklamiert. Die unabänderliche Verringerung des Gewinnes etablierter Unternehmen führt zum Auftritt neuer Marktteilnehmer mit frischen Ideen, die einen medialen Hype verursachen und so den unabwendbaren Ruin auch großer Firmen herbeiführen können. Das ermöglicht es den Start-Ups ihren Erfolg auf den Ruinen der gescheiterten Vorgänger zu errichten. Diese „schöpferische Zerstörung“<sup>5</sup> ist die elegantere und weniger blutige Form der Revolution. In den 1990er Jahren hatten Bower und Christensen dieses Konzept zur Erklärung des Scheiterns großer Unternehmen genutzt und als „disruptive Technologien“ bezeichnet [6]. Das betagte Konzept der Disruption<sup>6</sup> ist jedoch keineswegs veraltet, sondern durchaus „en vogue“. Eine disruptive Grundhaltung findet sich beispielsweise in Facebooks Mantra „Move fast and break things“ [7] und 2015 galt die Disruption der „Frankfurter Allgemeinen“ als Wort des Jahres unter Deutschlands Geschäftsleuten [8].

Am Beispiel der Innovation lässt sich eines recht gut illustrieren. Auch wenn moderne Erzeugnisse gern mit den Etiketten Weltneuheit, Revolution oder Disruption ausgezeichnet werden, so bleibt doch die vorherige Entwicklungsgeschichte bestehen. In Wahrheit haben auch die modernsten Technologien historische Vorläufer und sind in den seltensten Fällen völlig überraschend aufgetaucht. Mitunter ist eine neue Technologie nur eine zeitgemäße Adaption einer früheren Technik, die mit den heute verfügbaren Mitteln und Verfahren zu besseren oder schnelleren Ergebnissen führt. Noch jede Smartphone-Kamera basiert auf der Idee der Camera obscura, deren grundsätzliche Funktionsweise seit mehr als zwei Jahrtausenden zum Stand der Technik gehört.

Als ich mit der Arbeit zu diesem Buch begann, hatte ich zunächst geplant, mich vordergründig auf die technische Beschreibung der bildgebenden Darstellung zu konzentrieren. Je intensiver ich mich bei meinen Recherchen mit den Grundlagen der virtuellen Realität beschäftigte, umso wichtiger erschien mir aber die technikgeschichtliche Einordnung.

Ein Bild muss gesehen werden und dazu benötigt man das visuelle System. Die Augen und das Sehen sind wie der Mensch nicht plötzlich entstanden, sondern die Folgen einer viele Millionen Jahre währenden Evolution. Auch die Technik zur möglichst realistischen Bilderzeugung hat eine evolutionäre Geschichte, die einige Jahrtausende umfasst. Dass der stetige Erkenntnisgewinn immer auch auf dem Vorwissen früherer Generationen beruht, ist keine neue Feststellung.

Johannes von Salisbury zitiert schon 1159 in seinem Werk *Metalogicon* [9] aus dem Jahre 1159 den Philosophen Bernhard von Chartres mit dem bemerkenswerten Satz.

„Wir sind wie Zwerge, die auf den Schultern von Riesen sitzen, so dass wir mehr und weiter als sie sehen können – allerdings nicht vermöge der eigenen Sehschärfe oder Körpergröße, sondern weil wir durch die riesenhafte Größe in die Höhe emporgehoben und erhöht werden.“<sup>7</sup>

<sup>4</sup>„Gesetz des tendenziellen Falls der Profitrate“ (in [5], S. 191 ff.).

<sup>5</sup>„The Process of Creative Destruction“ (Kap. VII in S. 81 ff.).

<sup>6</sup>In Schumpeters „Business Cycles“ von 1939 wird zwar auch (schon) die disruptive Innovation erwähnt ([3], S. 101), eine vollständige Beschreibung gibt aber erst Christensen etwa 60 Jahre später.

<sup>7</sup>dt. Übersetzung von Klinghardt [10], in der lat. Ausgabe „*Metalogicus*“ [11] von 1610 (III. Buch, IV. Kapitel, S.148): „...ut possimus plura eis & remotiora videre, non utique propriij visus acumine, aut eminentia corporis, sed quia in altum subvehimur & extollimur magnitudine gigantea.“

Newton griff ein halbes Jahrhundert später dieses Bild auf und schrieb im Jahre 1675 in einem Brief an Hooke „If I have seen further it is by standing on ye shoulders of Giants.“<sup>8</sup>. Und so ist es auch auf dem Gebiet der virtuellen Realität. Man kommt nicht umhin, sich ein wenig mit den vormaligen Ideen zu beschäftigen und glaubt nach der Recherche, die Menschen dahinter etwas kennengelernt zu haben. Auf meiner virtuellen Reise durch die Zeit und bei der Lektüre von etwa Tausend Veröffentlichungen bin ich so auf mehr als fünfhundert Persönlichkeiten getroffen, die mir über ihre Bücher und Erfindungen einen Teil ihres Lebens offenbart hatten.

Es scheint mir angemessen, Ihnen diese Personen nach und nach vorzustellen. Da ich davon ausgehe, dass Sie mitunter gern etwas mehr als den Namen erfahren wollen, habe ich mir erlaubt, am Ende des Buches ein Personenregister anzuhängen, in dem ich jedem Einzelnen zumindest eine kurze Zeile spendiert habe. Bei Einigen war das recht einfach, von Anderen sind nur wenige Informationen bekannt, von Manchen ist sogar nur der Name überliefert. Ich habe mich jedoch nach Kräften bemüht zu Jedem immerhin grundlegende Kenntnis zu erlangen und dazu viele zusätzliche Quellen studiert.

In diesem Buch werde ich die Grundlagen der virtuellen Realität zunächst ganz besonders unter dem Aspekt der geschichtlichen Entwicklung betrachten, bevor ich auf die Ausprägung der Technik eingehe. Damit Sie mir folgen können, habe Ihnen meine Quellen vollständig offenbart. Wenn Ihnen nun etwas besonders interessant erscheint und Sie genau zu diesem Sachverhalt mehr wissen wollen, haben Sie so vielleicht einen ersten Anhaltspunkt, von dem Sie Ihre weiteren Studien starten können.

Die virtuelle Realität wird besonders über das Sehen erzeugt. Jede Form der Darstellung basiert dabei auf einer Technik, die verlässlich eine Reproduktion des darzustellenden Objektes ermöglicht. Die meisten Informationen werden über das Auge aufgenommen, wodurch die Kenntnis unserer Umgebung nicht nur maßgeblich visueller Natur ist, sondern dem Wesen nach auch immer perspektivisch. Es ist also ganz natürlich, dass auch der Versuch einer Nachbildung der Wirklichkeit sich hauptsächlich auf die visuelle Komponente stützt und die Nutzung der Perspektive die Kopien umso realistischer wirken lässt.

Das natürliche Sehen funktioniert nur durch die Wahrnehmung des von den Gegenständen ausgehenden Lichtes. Ohne diese erhellenden Strahlen ist die Beobachtung der Umgebung ganz einfach nicht möglich. Die Betrachtung eines Gemäldes in einem dunklen Raum ist genauso nutzlos, wie der Versuch, seinen Laptop mit ausgeschaltetem Backlight nutzen zu wollen. Die Illusion eines Bildes basiert aber nicht auf der Beleuchtung selbst, sondern auf der Interaktion des Lichtes mit den Strukturen und Farben des Objektes durch Reflexion, Absorption, Brechung, Streuung oder Beugung. Was wir sehen, ist nicht wirklich das Objekt, sondern die Veränderung der Lichtwirkung

---

<sup>8</sup> „Wenn ich weiter geblickt habe, so deshalb, weil ich auf den Schultern von Riesen stehe.“



des ins Auge gelangenden Lichtes. Die Illusion des Objektes wird erst durch das Licht erzeugt und ist folglich eine Illusion aus Licht.

Eine perfekte Illusion aus Licht muss die Wahrnehmung komplett täuschen und die äußere Gestalt eines Objektes vollständig wiedergeben. Perfekt ist die Täuschung dann, wenn der Betrachter nicht entdecken kann, ob er wirklich das Objekt sieht oder nur eine Abbildung des Gegenstandes. In der Bildschirmtechnik wird mit immer höherer Auflösung, besserer Farbwiedergabe oder einfach schierer Größe versucht, diesem Anspruch immer näher zu kommen. Dennoch bleibt ein entscheidender Unterschied des künstlichen Bildes zur realen Wirklichkeit: Das künstliche Bild liefert nicht die Raumwirkung der echten Szene. Eine Veränderung der eigenen Position bewirkt keine Veränderung der Perspektive im Bild, der räumliche Seheindruck bleibt bescheiden.

Das menschliche Sehen ist aber immer auch räumlich. Eine Wahrnehmung ohne Raumeindruck ist unnatürlich. Darum gab und gibt es immer wieder Versuche, die Bildwiedergabe um die Illusion des Raumes zu erweitern. In der Raumbild- oder 3D-Technik wurden und werden die unterschiedlichsten technischen Verfahren genutzt, um die Illusion noch perfekter zu gestalten.

Nach der Veröffentlichung meines Buches „3D ohne 3D-Brille“ [12] vor wenigen Jahren hat die Entwicklung der visuellen Raumdarstellung einen Weg genommen, den ich dort im Kapitel „Grenzen der Stereoskopie“ beschrieben und begründet hatte: Die negativen Effekte der Raumbildtechnik haben zur Ablehnung der 3D-Technologie geführt und als logische Konsequenz begraben nun nach und nach alle großen Hersteller von Unterhaltungselektronik die Produktion von 3D-Fernsehern. Die mediale Resonanz manifestiert sich in Schlagzeilen, wie zum Beispiel „3D-TV is dead“ oder „The end of 3D“. Aber ist das tatsächlich so?

Die Anwendung von „3D“ begrenzt sich nicht nur auf die Aufführung mehr oder minder gelungener Filme mit plastischer Wirkung im Kino oder in der Nutzung einer Virtual-Reality-Brille beim Computerspiel, sondern nimmt einen immer größeren Raum im alltäglichen Leben ein.

Tatsächlich hat die Erfassung und Wiedergabe dreidimensionaler Daten in den vergangenen Jahren stark an Bedeutung gewonnen.

Der Bezug zum 3D-Raum ist beim 3D-Druck noch offensichtlich. Bei Anwendungen in der Robotik, der künstlichen Intelligenz oder gar beim autonomen Fahren ist die Notwendigkeit einer 3D-Beschreibung des Raumes schon weit weniger augenscheinlich. Bei näherer Betrachtung wird jedoch schnell klar, dass in den genannten Beispielen eine räumliche Orientierung erforderlich ist. Diese Raumorientierung bezieht sich dabei nicht nur auf die Kenntnis der Eigenposition. Spätestens am Beispiel des autonomen Fahrens wird deutlich, dass auch eine Abschätzung von Entfernungen zu anderen Objekten von erheblichem Vorteil ist.

Die uns bekannte Realität wird heute nicht nur in 3D virtualisiert, sondern dabei um zusätzliche Informationen erweitert und mit der realen Welt vermischt.

Die Bezeichnung „3D“ wird wohl derzeit ein wenig „old-fashioned“ und wenig hipp wahrgenommen. Deutlich beliebter sind alle Namen, die gut zu dem englischen Wort für Realität

passen, wie z. B. „Virtual Reality“<sup>9</sup>, „Augmented Reality“<sup>10</sup> oder „Mixed Reality“<sup>11</sup>. Bei den heutigen interaktiven 3D-Brillen versucht man ganz einfach die Produktnamen zu etablieren (z. B. „RIFT“<sup>12</sup>, „Zeiss VR One“<sup>13</sup> oder „Playstation VR“<sup>14</sup>). Gern werden natürlich auch modern und technologisch fortschrittlich klingende Namen in Verbindung mit „Digital“ oder „Lightfield“<sup>15</sup> verwendet oder gar mit einem vorgeblichen Bezug zur Holografie<sup>16</sup>.

Man muss natürlich nicht unbedingt auf der Abkürzung „3D“ zur Beschreibung eines dreidimensionalen Raumes bestehen. Der Übergang von der realen Umgebung in die virtuelle Welt ist nicht einmal zwingend an die Existenz eines räumlichen Modells gebunden, die virtuelle oder erweiterte Realität kann auch eine Überlagerung rein zweidimensionaler Daten sein. Normalerweise wird jedoch auch eine Verortung der Daten und Objekte oder zumindest die Auswertung der Kopfposition des Betrachters gewünscht. Der Bildeindruck soll sich der Perspektive des Betrachters anpassen.

### Hintergrundinformation

Im Jahre 1999 besuchte mich Cees van Berkel<sup>17</sup> in meinem Labor und wir diskutierten die Unterschiede zwischen seinem 3D-Monitor (Philips 3D<sup>18</sup>) und meinem (4D-Vision<sup>19</sup>). Im Verlauf der Debatte sagte Cees: „Im Prinzip ist deine 3D-Maske ja auch nur ein Linsenraster“. Natürlich habe ich sofort protestiert und auf die Gegensätze hingewiesen, aber im Grundsatz hatte Cees absolut recht. Es kommt eben auf die Betrachtungsweise, die Perspektive, an.

Ich habe mich seitdem beharrlich mit der Darstellung beschäftigt und über die Jahre die unterschiedlichsten Systeme zur Vorspiegelung künstlicher Realität erforscht. Dabei ist immer deutlicher geworden, dass trotz der häufigen Betonung der Unterschiede in den verschiedenen Verfahren die Gemeinsamkeiten überwiegen. Die unterschiedlichen VR-Techniken sind durchaus miteinander vergleichbar.

Eine Perspektive bezeichnet die Wahrnehmung eines Sachverhaltes von einem bestimmten Standpunkt aus, beschreibt also die Betrachtungsweise. Die Perspektive ist aber ebenfalls die Beobachtung einer 3D-Szene aus einer Betrachtungsposition. Das ist die gewöhnliche Vorgehensweise bei der Aufzeichnung einer realen Szene. Aus mehreren Perspektiven entsteht bei geeigneter Wiedergabe durch einfache Betrachtung die Illusion der Realität.

Die Betrachtung eines Objektes aus mehreren Perspektiven scheint für sich genommen noch nicht die Bezeichnung zu 3D verdienen. Das aber ist das eigentliche Wesen der

---

<sup>9</sup>Virtuelle Realität, auch in der Abkürzung „VR“.

<sup>10</sup>Erweiterte Realität, auch in der Abkürzung „AR“.

<sup>11</sup>Gemixte Realität, in der Abkürzung „MR“.

<sup>12</sup>Für die 3D-Brille von OCULUS.

<sup>13</sup>Für die 3D-Brille von CARL ZEISS.

<sup>14</sup>Für die 3D-Brille von SONY.

<sup>15</sup>Oder auch gleich gemeinsam, wie z. B. im „Digital Lightfield“ für die 3D-Darstellung von MAGIC LEAP.

<sup>16</sup>Z. B. „Holographic Video“ für das 3D-Rendering von OTOY.

<sup>17</sup>Damals bei Philips Research Laboratories in Redhill, UK.

<sup>18</sup>Mit Linsenraster.

<sup>19</sup>Mit Parallax-Barriere.

Raumwahrnehmung: Erst die Unterschiedlichkeit des Gesehenen aus verschiedenen Perspektiven führt zu einem räumlichen Eindruck. Diese Vision beruht weder auf Einbildung noch Halluzination, sondern ist die Grundfunktion des räumlichen Sehens.

3D ist trotzdem nur ein Teil des großen Perspektivbildes. Aus dem Lichtfeld oder einem Hologramm einer Szene lässt sich der aufgezeichnete Raum rekonstruieren – nicht nur darstellen. Man kann sich nun in diesem virtuellen Raum bewegen, darin messen oder mit höchster Auflösung wiederum daraus eine bestimmte Perspektive gewinnen.

Ist die Perspektive also das Wesentliche? Eine Perspektive ist die Projektion des Raumes auf eine Fläche, vom dreidimensionalen Raum auf irgendeinen zweidimensionalen Sensor, von einer höherwertigen Dimension auf eine niedrigere. Die Perspektive selbst kann dreidimensional sei, wenn zum Beispiel aus einem vierdimensionalen Raum nur eine 3D-Ansicht gewonnen wird. Ein zweidimensionales Bild kann auch von einer Serie aus eindimensionalen Messwerten erstellt werden.

Reales 3D ist dabei keineswegs statisch. Die Anordnung der Objekte im Raum und die eigene Perspektive verändern sich bei der Betrachtung kontinuierlich. Die reale Welt ist den Elementen unterworfen; Wind und Wellen, Licht und Schatten verändern die äußere Erscheinung des Beobachtungsobjektes ständig. Die Veränderungen im Zeitverlauf verlangen nach der Beschreibung durch eine weitere Dimension: der Zeit. Damit wird unsere Welt vierdimensional (4D). Perspektive, Raum, Zeit und Vision sind die Fundamente der räumlichen Wahrnehmung und Illusion.

Ich will in diesem Buch den Dingen auf den Grund gehen und Ihnen die verschiedenen Verfahren zur Darstellung von der Antike bis zur Gegenwart nahebringen, aber auch besonders auf die Gemeinsamkeiten der Technologien hinweisen. Es wird Ihnen auffallen, dass auch die modernsten Technologien häufig nur aktuelle Umsetzungen historischer Erfindungen sind. Gemeinsam haben alle Techniken aber eines. Sie liefern immer Illusionen aus Licht.

Die perfekte Illusion ist nach wie vor eine Vision. Ein Gerät, dessen Bildwiedergabe sich nicht mehr von der Realität unterscheiden lässt, wurde noch nicht vorgestellt. Dennoch sind die Grundlagen gelegt, um die Vision der Illusion vielleicht schon bald Wirklichkeit werden zu lassen.

Dieses Buch ist ein Versuch, die Entwicklung künstlicher Perspektiven insgesamt zu beschreiben und daraus die Grundlagen der virtuellen Realität zu entwickeln. Vielleicht kann aber manches von dem Alten, was schon vor langer Zeit bedacht wurde, heute als Grundlage oder Inspiration für etwas Neues dienen. Oder, um es mit Walt Disney zu sagen<sup>20</sup>:

„If you can dream it, you can do it. Remember that this whole thing started with a dream and a mouse.“

Halbinsel Höri im Bodensee  
Herbst 2019

Armin Grasnick

---

<sup>20</sup>Aus einem Werbevideo der Walt Disney Company zur Neueröffnung des „Horizons“ im Walt Disney World Resort in Florida im Jahre 1983.

## Literatur

1. Schumpeter JA. Konjunkturzyklen: Eine theoretische, historische und statistische Analyse des kapitalistischen Prozesses. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht; 1961.
2. Schumpeter JA. Capitalism, socialism and democracy. 2. Aufl. New York: Harper & Brothers Publishers; 1942.
3. Schumpeter JA. Business cycles: a theoretical, historical and statistical analysis of the capitalist process. New York und London: McGraw-Hill Book Company; 1939.
4. Marx K, Engels F. Manifest der Kommunistischen Partei. London: Bildungs-Gesellschaft für Arbeiter; 1848.
5. Marx K. Das Kapital. Engels F, Herausgeber. Hamburg: Otto Meissner; 1894.
6. Bower JL, Christensen CM. Disruptive technologies: catching the wave. Harv Bus Rev. 1995;73(1):43–53.
7. WIRED. Mark Zuckerberg's Letter to Investors: „The Hacker Way“. WIRED. 1. Februar 2012. <https://www.wired.com/2012/02/zuck-letter/>. Zugegriffen: 22. Dez. 2018.
8. Meck G, Weiguny B. Das Wirtschaftswort des Jahres: Disruption, Baby, Disruption! Frankfurter Allgemeine. 2015. [https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftswissen/das-wirtschaftswort-des-jahres-disruption-baby-disruption-13985491-p2.html?printPageArticle=true#pageIndex\\_1](https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftswissen/das-wirtschaftswort-des-jahres-disruption-baby-disruption-13985491-p2.html?printPageArticle=true#pageIndex_1). Zugegriffen: 22. Dez. 2018.
9. von Salisbury J. The metalogicon of John of Salisbury: a twelfth-century defense of the verbal and logical arts of the trivium. Berkeley: University of California Press; 1955.
10. Klinghardt M. Das älteste Evangelium und die Entstehung der kanonischen Evangelien. Tübingen: Francke; 2015.
11. von Salisbury J. Metalogicus : E codice M.S. Academiae Cantabrigensis. Paris: Beysl; 1610.
12. Grasnack A. 3D ohne 3D-Brille: Handbuch der Autostereoskopie. Springer; 2016. <http://www.springer.com/de/book/9783642305092#aboutBook>.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	1
1.1	Illusionserzeugung.....	2
1.2	Licht und Schatten.....	6
1.3	Holograph und Holografie.....	7
1.4	What the Hell...?.....	10
	Literatur.....	14
<b>2</b>	<b>Entdeckung der Perspektive</b> .....	17
2.1	Lichtsinn.....	18
2.2	Paleo-VR.....	43
2.3	Historische Sehtheorien.....	46
2.4	Antike Perspektiven.....	69
2.5	Projektionen aus dem Mittelalter.....	81
2.6	Multiperspektiven.....	99
	Literatur.....	107
<b>3</b>	<b>Bilder aus Licht</b> .....	121
3.1	Camera obscura.....	122
3.2	Laterna magica.....	137
3.3	Sonnenmikroskop.....	154
3.4	Bewegte Bilder.....	157
3.5	Fernsehen.....	187
3.6	Flüssige Kristalle.....	189
3.7	Leuchtende Kristalle.....	196
3.8	Strahlendes Plasma.....	199
	Literatur.....	201
<b>4</b>	<b>Virtuelle Illusionen</b> .....	213
4.1	Natürliches Raumsehen.....	214
4.2	Binokulare Raumwahrnehmung.....	220
4.3	Raumstörung.....	226

---

4.4	Stereoskope .....	231
4.5	3D-Brillen .....	239
4.6	Naked eye .....	250
4.7	Autostereoskopie .....	260
4.8	Lichtfeld .....	282
	Literatur .....	289
<b>5</b>	<b>Virtuelle Räume</b> .....	<b>299</b>
5.1	Panoramen .....	300
5.2	Duplizierte Realität .....	306
5.3	Interaktion .....	311
5.4	Reale Virtualität .....	331
	Literatur .....	354
<b>6</b>	<b>Schlussbetrachtung</b> .....	<b>365</b>
	Literatur .....	369
	<b>Personenregister</b> .....	<b>371</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	<b>427</b>



## Zusammenfassung

Aus technischer Sicht können heute alle relevanten Eigenschaften einer Szene in bester Qualität wiedergegeben werden – bis auf den Raumeindruck. Die Wiedergabe dieser so wichtigen Eigenschaft ist nach wie vor unbefriedigend. Häufig sind Raumbild-Techniken noch an 3D-Brillen gebunden, die als unangenehm empfunden werden können. VR-Brillen sind gegenüber dem historischen Stereoskop zwar fortschrittlich – aber dennoch Brillen. Und so hat sich eine gewisse Ablehnung der 3D-Technik etabliert, die zu dem Fehlschluss verleiten könnte, die 3D-Darstellung wäre reine Zeitverschwendung. Doch 3D-Aufnahmen sind in der Medizin längst alltägliche Notwendigkeit und müssen für die Tiefenwahrnehmung während eines Eingriffes auch wieder in 3D dargestellt werden. Vollständige 3D-Daten werden nicht nur für den 3D-Druck benötigt, sondern sind auch für eine interaktive Visualisierung unentbehrlich. Autonome Systeme und Roboter benötigen 3D-Informationen, um sicher im Raum navigieren zu können. Ich möchte Ihnen zeigen, dass immer wieder erstaunliche Technologien entwickelt wurden, um die Illusion der Realität zu verbessern, die Wirklichkeit aufzuzeichnen und wiederzugeben. Die Erzeugung einer realistischen Illusion ist keine unnütze Spielerei, sondern nimmt einen immer größeren Raum im täglichen Leben ein. Wer es will, der kann schon heute Raumbilder erzeugen und ohne 3D-Brille darstellen. Machen Sie sich mit der Technik der Illusion vertraut. Es ist an der Zeit.

## 1.1 Illusionserzeugung

### Die Technik der Bilder

#### ► Trailer

„In der Hoffnung auf viele friedlich-farbige, aber auch spannend-farbige Ereignisse“

(Willy Brandt anlässlich des Starts des Deutschen Farbfernsehens auf der 25. Großen Deutschen Funk-Ausstellung in Berlin am 25. August 1967 [1]).

Vor etwa einem halben Jahrhundert wurde das Farbfernsehen in Deutschland offiziell eingeführt. Bis zu diesem Zeitpunkt waren noch nicht einmal 40 Jahre vergangen, seitdem das elektronische Schwarz-Weiß-Fernsehen erstmalig vorgestellt wurde. Der allgemeine Wunsch nach lebensechter, farbiger Darstellung hat in dieser vergleichsweise kurzen Zeit die Innovationskraft erheblich befeuert und schließlich zu einer Technik geführt, die in der Lage ist, die natürlichen Farben zu imitieren.

Der Mensch ist neben der natürlichen Farbwahrnehmung ebenso natürlich zur Wahrnehmung anderer Eigenschaften einer Szene fähig, allen voran Bewegung, Auflösung und Raumanordnung.

Die heutige Technik hält viele Möglichkeiten bereit, eine Szene naturgetreu wiederzugeben. Ein aktueller Fernseher im Hochformat kann durchaus einen erwachsenen Mann überragen und Alltagsobjekte in Originalgröße darstellen. Selbst schnellste Bewegungen werden mit höchsten Bildwiederholraten flüssig dargestellt, die Auflösungen der Geräte sind längst hoch genug, um noch kleinste Details darzustellen.

Ganz ohne Zweifel will der Mensch seit jeher seine Umgebung möglichst naturgetreu wiedergeben und bedient sich dazu seit Urzeiten der Perspektive. Auf diese Weise gibt der Mensch das wieder, was er vorher so ähnlich bereits gesehen hat. Das Auge des Betrachters ist das Instrument, welches die Wahrnehmung diktiert und erst die Illusion einer Perspektive schafft. Daher ist das Auge der allererste Gegenstand unserer perspektivischen Betrachtung. Im Kapitel „Entdeckung der Perspektive“ werden sodann verschiedene Formen der perspektivischen Darstellung in unterschiedlichen Stadien der Menschheitsgeschichte vorgestellt – von der Steinzeit, über die Antike bis hin zur Renaissance. Eine Perspektive kann dabei überraschende Eigenschaften aufweisen und beispielsweise nur von einem ganz bestimmten Punkt aus wahrnehmbar sein, wie es bei einer anamorphen Abbildung der Fall ist. Dabei muss eine Perspektive nicht einmal solitär auftreten. Schon das natürliche Raumsehen ermöglicht die Wahrnehmung zweier unterschiedlicher Perspektiven zur gleichen Zeit. Einige oder mehrere Perspektiven können als Wechselbilder simultan wiedergegeben werden. Hierbei werden nun zwar unterschiedliche Perspektiven gleichzeitig dargestellt, das wahrgenommene Bild bleibt aber flach. Im Prinzip sehen beide Augen das gleiche Bild und erhalten so eine Wahrnehmung,



die im Wesentlichen dem Sehen des Einäugigen entspricht. Erstaunlicherweise kann aber auch der Einäugige 3D-Sehen<sup>1</sup>. Ein kleines Experiment wird Ihnen zeigen, wie überraschend gut das gelingen kann.

Das Sehen einer Raumillusion bedingt das Vorhandensein einer anständigen Wiedergabe. Die Entwicklung der entsprechenden Techniken ist im Kapitel „Bilder aus Licht“ dargestellt. Durch die Beobachtung der Gestirne entstand in der Antike der Wunsch nach Hilfsmitteln zu deren genauerer Verfolgung. Die ersten Abbildungen einer Camera obscura waren vermutlich die der Sonne und in deren Schein erkannte man schon früh die bildgebende Kraft des Lichtes. Zauberalaterne und Schreckenslampe erzeugten mittels dieser Abbildung mitunter eine unerfreuliche Illusion, die in der Folge noch mit etwas Bewegung für erhöhten Realismus und größeren Schrecken angereichert wurde. Die immer bessere Beleuchtung der Projektion ermöglichte nicht nur ernsthaftere Untersuchungen durch das Sonnenmikroskop, sondern beflügelte auch die Darstellung von Bewegung. Die Geräte waren bis zu dieser Zeit vollständig mechanisch. Die Entdeckung der Elektrizität katalysierte die Technik in eine neue Ära. Die Übertragung von Bild und Bewegung war nun über größte Entfernungen, ja sogar Kontinente. In kürzester Zeit entstand eine Vielzahl an Fernsehgeräten, die mit größerem Bild auch immer in die Tiefe wuchsen. Ein großes Bild verlangte einfach nach einem riesigen Möbel. Erst die Entwicklung der Flachbildschirme erlaubte die Kreation wirklich flacher Bildwiedergabegeräte.

Üblicherweise war dann auch der Bildeindruck flach. Wenn aber im natürlichen Sehen mit beiden Augen oder sogar einem einzelnen Auge ein 3D-Eindruck gewonnen werden kann, warum sieht man dann auf einem Bildschirm immer nur ein flaches Bild? Die Begründung liegt in der Art der Darstellung der Perspektiven. Sind die Perspektiven nicht nur doppelt vorhanden, sondern auch dergestalt wiedergegeben, dass sie zusammen ein 3D-Bild ergeben, spricht man von Stereoskopie. Den Raumeindruck, oder besser gesagt die Illusion des Raumes kann auf verschiedene Arten erreicht werden. Davon erzählt das Kapitel „Virtuelle Illusionen“. Die Mittel der Wahl sind dabei optischer Natur (z. B. Spiegel, Linsen, Prismen) oder nutzen die Möglichkeit einer gezielten Verdeckung (z. B. Farbfilter, Polarisation, Shutter, Zeitparallaxe). Mit einigem Training kann 3D-Sehen auch ganz ohne 3D-Brille gelingen. Den Parallel- oder Kreuzblick nun ausreichend zuverlässig und ohne Anstrengung auszuführen ist nicht jedem Menschen gegeben. Daher entstand bereits vor mehr als 100 Jahren der Wunsch, eine 3D-Darstellung ohne die Anwendung von „Augengymnastik“ oder die Nutzung von 3D-Brillen zu erreichen. Diese Technik wird unter dem Oberbegriff „Autostereoskopie“ zusammengefasst. Aber auch in der Autostereoskopie bleiben Wünsche offen. So bleibt der Betrachtungswinkel häufig eingeschränkt oder die Auflösung der Darstellung ist deutlich reduziert. Praktisch werden diese Einschränkungen durch das optische Raster, welches aus dem 2D-Bildschirm einen 3D-Bildschirm macht, erzeugt.

---

<sup>1</sup>...und in Deutschland am Straßenverkehr teilnehmen, was eine ausreichende Raumwahrnehmung voraussetzt [2] (Anlage 6: Anforderungen an das Sehvermögen).

Der virtuelle Raum, den ein 3D-Monitor erzeugt, ist aber immer durch die Größe des Anzeigesystems begrenzt.

Wäre es nicht wunderbar, auf den Bildschirm verzichten zu können, um mittendrin im Geschehen zu sein?

Das auch dieser Wunsch erreichbar ist, wird im Kapitel „Virtuelle Räume“ beschrieben. Es ist begreiflich, dass die ersten virtuellen Räume in realen Rundgebäuden installiert wurden. Diese begehbaren Panoramen erfüllten den Wunsch nach einer virtuellen Umgebung schon im Ansatz, ließen aber keine Möglichkeit zur Darstellung echter Bewegung zu. Mit dem Beginn großformatiger Kino-Projektionen endlich Bewegung in die Sache. Mehr noch, die Bewegung blieb nicht auf die Leinwand beschränkt, sondern dehnte sich bis auf den Beobachter aus. Der Beginn von Interaktion mit der Darstellung begann mit der Entwicklung von Schieß- und Flugtrainern zur Zeit des ersten Weltkrieges.

Echte Interaktion ist aber keineswegs ans Kriegstreiben gebunden. Nach dem Ende des zweiten Weltkrieges begann die Entwicklung der Computertechnik. Durch diese neue Technologie konnten nun spezielle virtuelle Räume geschaffen werden, die zu der jeweiligen Position des Betrachters passten. Ein auf den Kopf geschnalltes Stereoskop lieferte dem Betrachter dazu eine wunderbare Illusion. Diese Head-Mounted-Displays in verschiedenster Ausprägung sind das am häufigsten verwendete Motiv, auf das man stößt, wenn man sich intensiv mit der virtuellen Realität beschäftigt.

Solche Systeme können einen außerordentlichen Raumeindruck liefern, zwingen aber den Träger des 3D-Gestells aber auch zu einer Abschottung von der Welt. Die Interaktion mit der Umwelt steht unter der Einschränkung „Nur gucken, nicht anfassen“.

Die künstliche Realität sollte nicht an die Nutzung von Brillen, Displays oder Headsets gebunden sein. Dazu werden im Kapitel „Virtuelle Räume“ weitere Überlegungen angestellt. Aber wie sieht eine naturgetreue Wiedergabe aus, wie muss man sich das ultimative 3D-Display vorstellen? Bekannte Zukunftsvisionen sind die Projektion der Prinzessin Leia aus Star Wars oder des „Medizinisch-Holografischen Notfallprogramms“ vom Raumschiff Voyager. Eine scheinbar nahliegende Ausführung ist auch das „Holo-deck“ aus der Fernsehserie Star Trek. Eine visuelle Annäherung könnte irgendwann gelingen, aber wird man die Objekte dann auch berühren und fühlen können? Haptische Projektionen gelingen nur in Ansätzen, von einer fühlbaren Interaktion mit einer realistischen Grafik kann kaum die Rede sein. Ein echtes Erlebnis kann aber auch ohne reales Sehen, Fühlen oder Hören stattfinden – z. B. im Traum. Die geschriebene Vision<sup>2</sup> dazu existiert bereits als „Phantomatik“ und beschreibt die Stimulation der Sinne oder direkt des Gehirns zur Erzeugung einer künstlichen Realität. Diese direkte Form der virtuellen Wahrheit wird in dem Film „Matrix“ thematisiert, worin diese erweiterte, aber völlig ungewollte Realität dramatisch inszeniert wurde.

---

<sup>2</sup>Bereits 1964 beschreibt Stanislaw Lem in der „Summa technologiae“ [3] die virtuelle Realität.

Auch die ausgereiftesten Verfahren der virtuellen Realität nutzen aber im Wesentlichen die periphere Virtualisierung durch die Schaffung bestimmter, zumeist visueller Reize.

Die Reproduktion von Materie und damit eine reale Rekonstruktion von Objekten gelingt bisher nur im 3D-Drucker unter definierten Bedingungen und fernab der Illusion von Interaktion oder gar Echtzeit. Eine Verarbeitung oder Darstellung von realen Raumdaten in Echtzeit ist so nicht möglich. Um Objekte im Raum zu schaffen, die tatsächlich existieren, um die man herumlaufen und mit denen man interagieren kann, bedient man sich der Volumendarstellung. Natürlich verzichtet man dann wieder auf die Möglichkeit der Berührung der virtuellen Objekte. Neben verschiedenen Voxel-Systemen ist die Holografie das eleganteste der Verfahren. Die Aufnahme erfolgt nunmehr sogar ohne Kamera, dafür wird zur Aufnahme kohärentes Licht benötigt, das in der Natur im Prinzip nicht vorkommt. Zur Beleuchtung wird also ein Laser benötigt. Die Rekonstruktion kann allerdings mit normalem Licht erfolgen, wodurch sich die Anwendbarkeit erhöht. Zur Lösung des Beleuchtungsproblems bietet sich eine Kombination von Autostereoskopie und Holografie an, womit nun eigentlich alle Probleme gelöst sein sollten. Ein bestimmter Teil des Hologramms enthält jetzt die Perspektive und die abbildende Optik in Form eines Interferenzmusters gleichzeitig. Die Auflösung des Bildes kann so hoch sein, dass diese autostereoskopischen Strukturen unterhalb der Wahrnehmungsgrenze liegen und somit nicht mehr störend wirken. Allerdings entsteht so ein anderes Problem. Die Auflösung des Bildschirms müsste so hoch sein, dass kein heutiger Monitor in der Lage wäre, ein derartiges Interferenzbild wiederzugeben.

Es scheint eine unübersehbare Vielfalt an Technologien zur Darstellung virtueller Realität zu geben. Deshalb ist zum Schluss noch ein kurzer Abschnitt angefügt, in dem ein Versuch der Sortierung und Einordnung der Technik gemacht wird.

Alle bisher genannten Verfahren beschreiben nur das, was schon existiert. Es steht außer Zweifel, dass neue Technologien entstehen werden, die viele der bisherigen Nachteile überwinden werden. Aber werden die neuen Techniken auch Perspektiven nutzen? Kann die Nutzung der althergebrachten Perspektive überhaupt etwas Neues hervorbringen? Die Betrachtung der Perspektive als Vision erlaubt einen anderen Standpunkt. Sieht man die uns umgebende Welt als ein Feld von verteilten Reizen an, dass von den Sinnen im Raum erfasst wird, lässt sich eine reale Szene auch als ein Ereignisfeld interpretieren. Die Aufzeichnung dieses Ereignisfeldes aus unterschiedlichen Perspektiven erlaubt wiederum die Rekonstruktion des Raumes. Wenn bei der Aufnahme eine Vielzahl von Kameras gleichzeitig eingesetzt werden, können auch sich bewegende Szenen aufgezeichnet und analysiert werden. Üblicherweise kommt dazu ein Sensor mit möglichst hoher Auflösung zum Einsatz. Überraschenderweise lassen sich auch Bilder aufnehmen, wenn der Sensor nur über einen einzigen Pixel verfügt. Allerdings zeichnet eine Single-Pixel-Kamera letztlich nur die Intensität des einfallenden Lichtes auf. Betrachtet man auch die Phase des einfallenden Lichtes, kommt man wieder auf die Holografie zurück. Hierbei wird eine dreidimensionale Szene auf ein zweidimensionales Medium aufgezeichnet und bei Bedarf wieder rekonstruiert. Dadurch findet eine Reduktion des

benötigten Aufzeichnungsmediums um eine Dimension statt. Überträgt man diese Idee in einen größeren Maßstab, könnte man nach dem holografischen Prinzip das gesamte Universum auf einer riesigen Fläche speichern.

Es zeigt sich deutlich, dass die Technik zur Aufnahme und Wiedergabe der Realität in vielen Varianten und Abwandlungen existiert. Es wird für jede neue Anwendung notwendig sein, die beste Methode für den konkreten Fall zu selektieren.

In den nachfolgenden Kapiteln wird ein umfassender Überblick über die unterschiedlichen Verfahren gegeben, der eine geschichtliche Einordnung, fundierte Auswahl und professionelle Anwendung von Bildtechnologie und Raumbildtechnik ermöglichen soll.

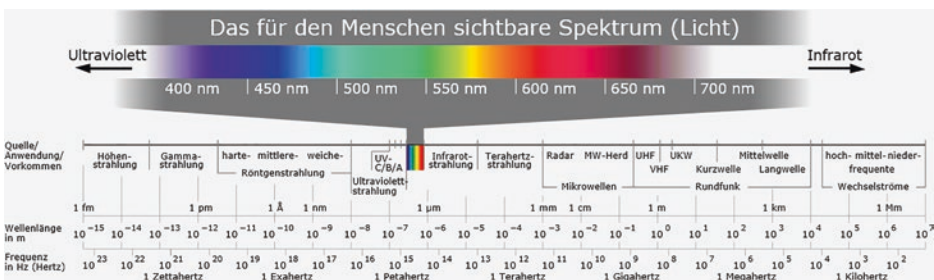
Dieses Buch soll aber vor allem eines sein: Ein Anstifter für eigene Ideen durch Kenntnis der Grundlagen der virtuellen Realität.

## 1.2 Licht und Schatten

### Licht als Grundlage der Abbildung

Es steht außer Frage, dass eine Abbildung ohne die erhellende Kraft des Lichtes für den Menschen nicht wahrnehmbar ist. Die optische Wahrnehmung der Umwelt basiert auf der sensorischen Erfassung des Lichtes, das die Objekte in beobachteten Raum erst sichtbar macht. Der physiologische Aufbau des Auges erlaubt das Sehen nur in einem begrenzten Abschnitt des elektromagnetischen Spektrums, der demzufolge auch das „sichtbare Spektrum“ genannt wird (s. Abb. 1.1).

Die Ausbreitung des Lichtes erfolgt geradlinig von einem leuchtenden Punkt in unterschiedliche Raumrichtungen. Die abgestrahlte Intensität und die Wellenlänge des Lichtes unzähliger Punkte ergeben ein Strahlungsfeld aus unendlich vielen Lichtstrahlen – das Lichtfeld. Die Intensität des Gesehenen wird als Helligkeit wahrgenommen, ein gewisser Wellenlängenbereich ergibt den Eindruck einer bestimmten Farbe. Das von den betrachteten Objekten ausgehende Lichtfeld kann aus unterschiedlichen Positionen gesehen werden und ergibt von jedem neuen Standpunkt einen etwas veränderten



**Abb. 1.1** Elektromagnetisches Spektrum, Horst Frank/Phrood/Anony (2008), Wikimedia Commons

Seheindruck. Dieser Eindruck entspricht im Wesentlichen einer geometrischen Zentralprojektion der Szene mit dem Auge als Fluchtpunkt. Die Wahrnehmung des Lichtfeldes von einem bestimmten Ort erzeugt im Auge des Betrachters die Projektion dieser Ansicht als ortsabhängige Perspektive.

Die Projektion eines Bildes stellt den umgekehrten Prozess des Sehens dar. Die aufgezeichnete Perspektive wird beleuchtet und mit einem Projektor auf eine geeignete Fläche „geworfen“. Schon die lateinische Urform „proiectio“ bezeichnet das Vor- oder Hervorwerfen von etwas. Die deutsche Bezeichnung Bildwerfer beschreibt diesen Prozess ausgezeichnet.

Nachdem die Wiedergabe für lange Zeit nur als statisches Bild möglich war, wurde zum Ende des 19. Jhdts. auch die mechanische Wiedergabe bewegte Bilder möglich. Mit der Nutzung des elektrischen Stroms begann auch eine Elektrifizierung der Darstellungstechnik. Auch hier gilt die Forderung nach Beleuchtung. Immer hellere Glühlampen lieferten besseres Licht und erlaubten größere Projektionen. Bei einer Fernsehöhre kann ganz und gar auf eine Beleuchtung verzichtet werden. Hier leuchtet der vom Kathodenstrahl getroffene Phosphor und liefert so das wahrnehmbare Licht. Ein Flachbildschirm verfügt in der Regel wieder über eine Hintergrundbeleuchtung, die für normale Lichtverhältnisse im Gebäudeinneren ganz passabel ist. Bei der Betrachtung eines Laptopbildschirms am sonnigen Strand hat man diesen positiven Eindruck nicht mehr. Die Helligkeit hat aber nicht nur einen Einfluss auf die Lesbarkeit, sondern auch auf den Realismus der Wiedergabe.

Die Helligkeit des Tageslichtes kann derzeit von keinem Bildschirm wiedergegeben werden. Und so ist auch eine hochauflösende Abbildung eines sonnigen Strandes einfach als das zu erkennen, was es ist – ein schönes, aber unvollständiges Bild der Wirklichkeit.

---

## 1.3 Holograph und Holoskopie

### Mögliche und unmögliche Wortbildungen in 3D

#### ► Trailer

Unter einem „Holograph“ könnte man ein Aufzeichnungsgerät für Hologramme oder die Berufsbezeichnung eines Herstellers von Hologrammen verstehen. Tatsächlich wird das Wort „Holograph“<sup>3</sup> aber im deutschen Sprachraum üblicherweise nicht in diesem Zusammenhang verwendet, sondern gelegentlich als Bezeichnung für ein eigenhändig verfasstes und vom Verfasser unterzeichnetes Dokument verwendet<sup>4</sup>. Im englischen Sprachraum ist

---

<sup>3</sup>Das Wort existiert im Wörterbuch der deutschen Sprache weder in der Schreibweise „Holograph“ noch „Holograf“.

<sup>4</sup>Dann als „Holographon“ oder „Holografon“ bzw. „Holographum“ oder „Holografum“.

diese Auslegung üblicher [4], in der kanadischen Provinz Ontario sogar ein feststehender Rechtsbegriff (holograph will<sup>5</sup>).

Der Begriff „Holoskopie“ scheint sich vorzüglich als Oberbegriff für die gesamte 3D-Technologie zu eignen, da dieser als Zusammensetzung aus dem Präfix „holo“<sup>6</sup> und dem Suffix „skopie“<sup>7</sup> in der Bedeutung „das Ganze vollständig beobachten“ den Sachverhalt erstklassig beschreibt: Man betrachtet die Dinge vollständig, in allen Dimensionen, dreidimensional. Ein ausgezeichnete Fachbegriff, der allerdings kaum verwendet ist.

Diese beiden Beispiele zeigen schon, dass auch in der 3D-Technik die Begriffe nicht immer erwartungsgemäß gebraucht werden, sondern in Bedeutung oder Bezeichnung vom Üblichen abweichen können.

### 3D-Präfixe

In der Raumbildtechnik werden einige Vorsilben (Präfixe) häufig gebraucht und im Zusammenhang mit anderen Begriffen genutzt. Die Kenntnis dieser Präfixe erleichtert das Verständnis spezieller 3D-Wortschöpfungen. In der nachfolgenden Tabelle ist übliche Bedeutung der jeweiligen Wörter dem Indogermanischen Etymologischen Wörterbuch [6], dem Lateinisch Etymologischen Wörterbuch [7] beziehungsweise dem Altgriechischen Herkunftswörterbuch [8] entnommen und dabei –wo es nötig erschien– um die gebräuchliche Bedeutung ergänzt (Tab. 1.1).

**Tab. 1.1** 3D-Präfixe

Präfix	übliche Bedeutung	Nutzung
Stereo-	Starr, fest, hart (auch körperlich → räumlich)	Stereoskop, Stereoskopie, Stereofotografie
Holo-	Ganz, völlig, vollständig	Holografie, Hologramm
Auto-	Selbst, allein	Autostereoskopie, Autofokus
Multi-	Viel, vielfach, zahlreich	Multiview, Multifokus, multispektral
Super-	Über, oberhalb	Superresolution, Supermultiview
Hyper-	Über, über ... hinaus, oberhalb (zumeist als Steigerung von Super)	Hyperstereo <sup>a</sup> , Hyperview

<sup>a</sup>Stereofotografie mit vergrößerter Stereobasis

<sup>5</sup>Ein handschriftliches, vom Verfasser unterzeichnetes Testament [5].

<sup>6</sup>Aus dem griechischen „hólos“ abgeleitet in der Bedeutung von ganz, völlig, vollständig.

<sup>7</sup>Aus dem griechischen „skopein“ abgeleitet in der Bedeutung von beobachten, zielen, untersuchen [6], S. 984,

### 3D-Suffixe

Analog zu den Präfixen haben auch die Suffixe eine übliche Bedeutung, die auf die wahrscheinliche Anwendung eines so benannten Dinges hinweist. Ein mit „-meter“ bezeichnetes Gerät wird vermutlich für die Messung von irgendetwas eingesetzt, mit einem „-skop“ wird man etwas beobachten wollen (Tab. 1.2).

Die übliche Bezeichnung 3D (oder 3-D<sup>8</sup>) ist bekanntermaßen nur die Abkürzung für „dreidimensional“.

Aber wussten Sie auch, dass Laser nur das Akronym für „Light amplification by stimulated emission of radiation“<sup>9</sup> ist? Diese Bezeichnung wurde von einem Doktoranden<sup>10</sup> der Columbia University namens Gordon Gould geprägt, der die Bezeichnung und Abkürzung erstmalig<sup>11</sup> in seinem 1957 Laborbuch<sup>12</sup> erwähnte [14].

**Tab. 1.2** 3D-Suffixe

Suffix	übliche Bedeutung	Anwendung
• -graph oder -graf	Aufzeichnungsgerät oder Berufsbezeichnung	Stereograph, Perspektograph
• -meter	Messgerät	Photometer, Perspektometer <sup>a</sup> , Stereometer <sup>b</sup>
• -graphie oder -grafie	Prozess der Aufzeichnung	Stereografie, Holografie
• -gramm	das Aufgezeichnete	Stereogramm, Hologramm
• -skop	Beobachtungsgerät	Teleskop, Stereoskop, Oszilloskop
• -skopie	Beobachtungstechnik	Mikroskopie, Stereoskopie, Autostereoskopie

<sup>a</sup>Hilfsmittel zur Ermittlung der geodätischen Orientierung von Ballonaufnahmen [9]

<sup>b</sup>Als Stereometer wurde ursprünglich (seit dem frühen 19. Jhd., s. a. [10]) ein Apparat zur Bestimmung des Volumens von Pulvern verwendet [11]. Im Zusammenhang mit der Stereobildauswertung wurde etwa ab Beginn des 20. Jhd. die Bezeichnung Stereometer für ein Gerät benutzt, mit dem die Abstände gleicher Objekte in einem Stereobildpaar vermessen werden konnten (z. B. von Pulfrich [12])

<sup>8</sup>Die vom Duden empfohlene Form ist „3-D“, allerdings ist die Schreibweise „3D“ gebräuchlicher.

<sup>9</sup>Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung.

<sup>10</sup>Beim Nobelpreisträger Polykarp Kusch.

<sup>11</sup>Wobei hier nicht unerwähnt bleiben soll, dass Charles Townes an der gleichen Universität wenige Jahre zuvor den MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) entwickelte und dafür gemeinsam mit Nikolai Bassow und Alexander Prochorow 1964 den Nobelpreis erhielt „...for fundamental work in the field of quantum electronics, which has led to the construction of oscillators and amplifiers based on the maser-laser principle“ [13].

<sup>12</sup>Gould schreibt dort: „Some rough calculations on the feasibility of a LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“.

## 1.4 What the Hell...?

### Autostereoskopie, Holografie oder virtuelle Realität?

In der Literatur werden unterschiedliche Bezeichnungen zur Beschreibung einer möglichst wirklichkeitsnahen Nachbildung der Realität genutzt. Die Erläuterung von Unterschieden oder Gemeinsamkeiten der Bezeichnungen ist in der Regel kein Bestandteil einer technischen Ausbildung. Tatsächlich werden die Bezeichnungen mitunter missverständlich<sup>13</sup> oder ohne weitere Erläuterung rein plakativ verwendet. Die Kenntnis der Bedeutung einiger grundlegender Begriffe der 3D-Darstellung ist für das Verständnis der nachfolgenden Kapitel von Vorteil. Deshalb sollen in diesem Abschnitt einige der gebräuchlichsten Wortschöpfungen vorgestellt werden.

#### Stereoskopie

Der Begriff Stereoskopie wurde 1838 durch Charles Wheatstone geprägt, der in einem Betrag über die Physiologie des Sehens auch „über einige bemerkenswerte und bisher nicht beobachtete Phänomene des binokularen Sehens“ berichtete [15]. Grundsätzlich umfasst die Stereoskopie alle Verfahren zur Aufnahme und Wiedergabe räumlicher Bilder. Üblicherweise werden mit dem Begriff Stereoskopie aber nur diejenigen Verfahren und Techniken bezeichnet, die auf irgendeine Art ein stereoskopisches Bildpaar, bestehend aus einem rechten und einem linken Bild, aufzeichnen oder wiedergeben.

► Stereoskopie bezeichnet die Gesamtheit aller Verfahren, bei denen eine 3D-Raumillusion durch ein stereoskopisches Bildpaar entsteht.

#### Autostereoskopie

Unter dem Begriff der Autostereoskopie (seltener auch Auto-Stereoskopie) fasst man üblicherweise diejenigen Technologien zusammen, die einen der Raumeindruck mit den grundsätzlichen Mitteln der Stereoskopie ermöglichen, ohne, dass dabei eine 3D-Brille benötigt wird<sup>14</sup>. Die nachfolgende Definition ist dem Handbuch der Autostereoskopie [16] entnommen.

► Autostereoskopie bezeichnet die Gesamtheit aller Verfahren, bei denen eine 3D-Raumillusion unter Verzicht auf 3D-Brillen durch binokulare Darstellung erreicht wird.

Die Bezeichnung „Automultiscopy“ tritt vereinzelt im englischen Sprachraum auf<sup>15</sup> und meint im Prinzip das Gleiche. Hier soll in der Wortschöpfung insbesondere auf

---

<sup>13</sup>Oder mitunter sogar absichtlich falsch, um eine bestimmte (zumeist eigene) Technologie in der Medienresonanz künstlich zu überhöhen.

<sup>14</sup>Daher auch die Bezeichnung als „3D ohne 3D-Brille“ oder „glasses free 3D“.

<sup>15</sup>Die deutsche Entsprechung „Automultiskopie“ wird überhaupt nicht verwendet.



die gleichzeitige Verwendung mehrerer (multipler) Perspektiven hingewiesen werden. Dadurch liegt in dieser Bezeichnung eine ungünstige Verquickung aus dem automatischen Prozess der 3D-Wahrnehmung (auto + skopie) und der verwendeten Technologie (multi) vor.

- ▶ Für alle Verfahren gemäß obiger Definition wird die Verwendung des Begriffes „Autostereoskopie“ empfohlen.

Eine Beschreibung verschiedener Technologien zur Autostereoskopie findet im Kapitel „Virtuelle Illusionen“ im Abschnitt Autostereoskopie.

### **Lichtfeld**

Hauptsächlich in den USA und in jüngerer Zeit wird für eine räumliche Verteilung der Begriff „Lichtfeld<sup>16</sup>“ verwendet. Grundsätzlich nutzt man in dieser Art der Beschreibung das physikalische Modell eines Feldes, in dem verschiedene messbare physikalische Größen<sup>17</sup> räumlich definiert angeordnet sind. Der russische Physiker Gershun beschrieb 1936 die fotometrische Verteilung des Lichtes als messbare Intensität. Anhand der englischen Übersetzung „The Light Field“ [17] wurde die Idee mit den Anfängen der Computergrafik wieder aktiviert und erhielt spätestens mit der Lichtfeldkamera von Lytro aktuelle Aufmerksamkeit. Dabei wird nun besonders die Eigenschaft hervorgehoben, dass die Wahrnehmung des Lichtfeldes abhängig von der Betrachterposition und der Betrachtungsrichtung ist. Ein beidäugig betrachtetes Lichtfeld ist demnach dreidimensional. Der Begriff Light Field wird häufig im Zusammenhang mit Autostereoskopie und insbesondere Integralfotografie genannt.

- ▶ Ein Lichtfeld beschreibt die Verteilung der Lichtintensitäten in einem Raum, in dem von allen Punkten aus in alle Richtungen hin gemessen wird.

In der praktischen Anwendung wird das Lichtfeld häufig mittels eines Kamera- oder Mikrolinsenarrays aufgezeichnet oder über ein Linsenraster wiedergegeben. Ein Lichtfeld-Datensatz kann also durchaus zweidimensional aufgezeichnet und rekonstruiert werden. In diesem Sinne ähnelt die Lichtfeldtechnik der Holografie, allerdings werden bei der Holografie die Welleneigenschaften des Lichtes genutzt – beim Lichtfeld die reinen Intensitätseffekte der Strahlung.

---

<sup>16</sup>Light field.

<sup>17</sup>Im elektrischen Feld die Feldstärke, im Lichtfeld die Lichtintensität.

In Anlehnung an den Begriff „Holografie“ könnte man bei einem Verfahren unter Ausnutzung des Lichtfelds mit einiger Berechtigung auch von „Lumigrafie“<sup>18</sup> sprechen. Tatsächlich wurde 1996 von einem Team um Gortler eine Berechnung von Perspektiven basierend auf der Theorie des Lichtfelds vorgeschlagen, die den Titel „The Lumigraph“ trug [18].

Das Lichtfeld wird nochmals eingehend im Kapitel „Virtuelle Illusionen“ im Abschnitt „Lichtfeld“ besprochen.

### Holografie

Als Gabor an einem Ostertag des Jahres 1947 versuchte, die Auflösung eines Elektronenmikroskopes<sup>19</sup> zu verbessern, ging er dabei von der grundlegenden Idee der Trennung zwischen Aufnahme und Wiedergabe bei der Abbildung aus. Im ersten Schritt wird eine fotografische Aufnahme der gesamten Information einer Szene erstellt, die in einem zweiten Schritt wieder vollständig rekonstruiert wird [20]<sup>20</sup>. Bei Verwendung geeigneten Lichtes bei Aufnahme und Wiedergabe ist der Bildeindruck dann sogar dreidimensional. Gabor schlug dafür zunächst den Namen „Holoskop“<sup>21</sup> vor, der den Sachverhalt recht kompakt beschreibt. Da er aber die Bilder zu diesem Zeitpunkt bereits als Hologramme<sup>22</sup> bezeichnete, ist der Name „Holografie“ für das Verfahren dann doch deutlich passender<sup>23</sup>.

► Die Holografie bezeichnet die Gesamtheit aller Verfahren, bei denen eine dreidimensionale Abbildung unter Nutzung der Welleneigenschaften des Lichtes erfolgt.

Auf die Holografie wird später nochmals eingegangen.

### Virtuelle Realität

Die Realität<sup>24</sup> bezeichnet die Gesamtheit des Wirklichen. Dinge in der Realität existieren tatsächlich. Virtualität bezeichnet dagegen das mit dem Wirklichen vergleichbare, aber nicht reale Vorhandensein maßgeblicher Eigenschaften der Realität. Dinge in der Virtualität existieren nur scheinbar. Virtuelle Realität ist also das angebliche Vorhandensein der Wirklichkeit, eine Illusion der Realität.

---

<sup>18</sup>Luminis (lat.) = Licht.

<sup>19</sup>In der Erstveröffentlichung 1948 schlägt er für seine neuartige Methode die Bezeichnung „electron interference microscope“ vor [19].

<sup>20</sup>Gabor berichtet darüber in seinem Vortrag anlässlich der Verleihung des Nobelpreises.

<sup>21</sup>„Moreover three-dimensional objects may be recorded in one photograph, hence the suggested name „holoscope“ which means „entire“ or „whole“ vision.“ (aus [21]).

<sup>22</sup>„holograms“ (aus [21]).

<sup>23</sup>„-gramm“ das Aufgezeichnete, „-grafie“ der Prozess der Aufzeichnung.

<sup>24</sup>Lat. realitas.

► Die virtuelle Realität beschreibt den Sinneseindruck von Wirklichkeit durch künstliche Stimulation der Wahrnehmung.

In Platons Höhlengleichnis<sup>25</sup> erzählt Sokrates seinem Schüler Glaukon zur Illustration der Wahrnehmung von Realität eine fiktive Geschichte von Höhlenbewohnern, die „von Kindheit an gefesselt an Kopf und Schenkeln“ immer nur die Schatten von absichtlichen Täuschungen sehen und niemals die Dinge selbst. Sokrates nimmt nun an, dass diese Gefangenen nicht imstande sein können, die Realität von der Fiktion zu unterscheiden, da die wahre Gestalt der Dinge ihnen gänzlich unbekannt ist (aus [22], S. 362):

„Auf keine Weise also können diese etwas anderes für das wahre halten als die Schatten jener Kunstwerke?“

Diese Form der Erzeugung einer scheinbaren Realität setzt einen massiven Eingriff in die Persönlichkeitsrechte voraus und ist mit legalen Mitteln kaum zu bewerkstelligen.

Ovid verdanken wir die Geschichte des Pygmalion und seiner überaus realistisch elfenbeinernen Plastik, in die sich Pygmalion verliebt und die dann durch die Gnade der Venus zum Leben erwacht [23]. Diese Geschichte inspirierte in den kommenden Jahrhunderten immer wieder zahlreiche Dichter und verführte schließlich auch Goethe zu seiner Jugendgeschichte Pygmalion.

Auch Goethes Weggefährte Herder verwendete dieses fiktive Ereignis in einer philosophischen Abhandlung. Er teilte dort die Dinge in ihre wirkliche Gestalt und sinnliche Wahrnehmung ein und unterschied alsdann zwischen den Sinnen Gefühl und Gesicht zur Empfindung von Körper und Gestalt in der Bildhauerkunst und Malerei [24]

Eine technische Lösung zur Vorspiegelung falscher Tatsachen ohne die tatsächliche Fesselung des Publikums und unter Verzicht auf göttlichen Beistand wäre die Nutzung einer Täuschungsbrille.

1930 lässt Weinbaum in seiner Kurzgeschichte „Pygmalion’s Spectacles“ [25] den seltsamen Professor Ludwig eine eigentümliche Vorrichtung beschreiben, mit der ein Traum Wirklichkeit werden kann (aus [26], S. 174):

„Ich fotografiere die Geschichte in einer Flüssigkeit mit lichtempfindlichen Chromaten. ... Chemisch füge ich Geschmack hinzu, den Ton elektrisch. Wenn dann die Geschichte aufgenommen ist, dann bringe ich die Lösung in meine Brille, meinen Film-Projektor. Ich elektrolysiere die Lösung, die Geschichte, das Bild, den Ton, den Geschmack, den Geruch –alles!“

Diese fiktive Brille zur Wahrnehmung vollständiger virtuelle Realität war eine literarische Anbahnung der technischen Machbarkeit solcher Fiktionen.

Der polnische Schriftsteller Lem unternahm in seiner 1964 erschienenen „Summa technologiae“ [3] den Versuch die unabsehbare Zukunft vorherzusagen. Das gesamte

---

<sup>25</sup>Im 7. Buch der Politeia („Der Staat“).

sechste Kapitel widmete Lem dabei der Phantomologie<sup>26</sup>, die sich u. a. mit dem technischen Problem der Phantomatik<sup>27</sup> beschäftigt (aus [3], S. 321):

„Ist es möglich, eine künstliche Realität zu schaffen, die der natürlichen vollkommen ähnlich ist, sich jedoch von ihr in keiner Weise unterscheiden lässt?“

Lem beschreibt in seinem Buch auch eine Brille als Vorsatz für die Augen<sup>28</sup> ([3], S. 325) und nimmt damit die spätere Entwicklung der Virtual-Reality-Brillen bereits voraus. Der Begriff künstliche Realität wurde in der englischen Form durch Kruegers Buch „Artificial Reality“ [27] bekannt und als „Virtual Reality“ seit den 90er Jahren des 20. Jhd. verwendet<sup>29</sup>.

---

## Literatur

1. Berezcky A. Wandel der Fernsichttechnik in 50 Jahren ZDF. Bewegt seit Generationen 50 Jahre ZDF. ZDF-Pressestelle; 2013. S. 39–41.
2. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Verordnung über die Zulassung von Personen zum Straßenverkehr. Fahrerlaubnis-Verordnung Dez 13, 2010.
3. Lem S. *Summa technologiae*. 7. Aufl. Frankfurt a. M.: Suhrkamp; 2016.
4. Encyclopædia Britannica. Definition of Holograph by Merriam-Webster. Merriam-Webster. 2017. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/holograph>. Zugegriffen: 30. Dez. 2017.
5. Ministry of the Attorney Ontario, CAGeneral. Holograph will. Glossary of terms. 2015. <https://www.attorneygeneral.jus.gov.on.ca/english/glossary/?id=470#results>. Zugegriffen: 30. Dez. 2017.
6. Pokorny J. *Indogermanisches Etymologisches Wörterbuch*. Bern: Francke; 1959.
7. Walde A. *Lateinisches Etymologisches Wörterbuch*. 2. Aufl. Heidelberg: Carl Winters Universitätsbuchhandlung; 1910.
8. Köbler G. *Altgriechisches Herkunftswörterbuch*. Online; 2007.
9. Scheimpflug T. Über Orientierung von Ballonaufnahmen. In: Dolezal E, Herausgeber. *Internationales Archiv für Photogrammetrie, Organ der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie*. Wien: K. u. K. Hof-Buchdruckerei Carl Fromme; 1911. S. 34–54.
10. Ventress JA. Description of a Stereometer. In: Brewster D, Herausgeber. *The Edinburgh Journal of Science*. Edinburgh: John Thomson; 1827. S. 143–5.
11. Bibliographisches Institut, Herausgeber. *Meyers Konversations-Lexikon*. 4. Aufl. Leipzig; 1885. <http://www.retrobibliothek.de/retrobib/stoebern.html?werkid=100149>
12. Seliger P. *Die stereoskopische Meßmethode in der Praxis*. Berlin: Julius Springer; 1911.
13. Nobel Media AB. *The Nobel Prize in Physics 1964*. Nobelprice.org. 2017. [https://www.nobel-prize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1964/](https://www.nobel-prize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1964/). Zugegriffen: 31. Dez. 2017.

---

<sup>26</sup>Als „Phantomologie“ bezeichnet Lem die wissenschaftliche Disziplin zur Erforschung der künstlichen Realität.

<sup>27</sup>„Phantomatik“ bezeichnet die Technik zur Erzeugung der künstlichen Realität.

<sup>28</sup>Das „Gegenauge“.

<sup>29</sup>Auch von Krueger selbst, z. B. in seinem späteren Buch „Artificial Reality II“ [28].

14. Gould G. Page from Gould's Lab Notebook (Internet). 1957. <https://photos.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/photos/gould-gordon-h1>.
15. Wheatstone C. Contributions to the Physiology of Vision. -Part the First. On Some Remarkable, and Hitherto Unobserved, Phenomena of Binocular Vision. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1838;128:371–94.
16. Grasnack A. 3D ohne 3D-Brille: Handbuch der Autostereoskopie. Springer; 2016. <http://www.springer.com/de/book/9783642305092#aboutBook>.
17. Gershun A, The Light Field. J Math Phys. 1939;18:51–151.
18. Gortler SJ, Grzeszczuk R, Szeliski R, Cohen MF. The Lumigraph. ACM Press; 1996. S. 43–54.
19. Gabor D. A new microscopic principle. Nature. 1948;161:777–8.
20. Lundqvist S, Herausgeber. Nobel lectures, Physics 1971–1980. Singapore: World Scientific; 1992.
21. Gabor D. Brief an Dr. J. B. le Poole (Delft) als Antwort auf le Pooles Brief vom 21. Januar 1948, in dem er die Bezeichnung „Holoscope“ vorschlägt. 1948.
22. Platon. Der Staat. Schleiermacher F, Herausgeber. Berlin: G. Reimer; 1828.
23. Ovid. Verwandlungen nach Publius Ovidius Naso. Berlin: Friedrich Vieweg der Ältere; 1798.
24. v. Herder JG. Plastik. – Einige Wahrnehmungen über Form und Gestalt aus Pygmalions bildendem Traume. Riga: Johann Friedrich Hartknoch; 1778.
25. Weinbaum SG. Pygmalions spectacles. Wonder Stories. 1935;7:28–39.
26. Weinbaum SG. Pygmalions Brille. Die besten Stories von Stanley G Weinbaum. Moewig Verlag; 1980. S. 171–96.
27. Krueger MW. Artificial reality. Reading: Addison-Wesley; 1983.
28. Krueger MW. Artificial reality II. Reading: Addison-Wesley; 1991.

## Entdeckung der Perspektive

# 2

### Die natürliche Wahrnehmung der Perspektive und deren Wiedergabe

#### Zusammenfassung

Nachdem das Auge in evolutionären Teilschritten über Jahrmillionen entstanden war, konnten die Lebewesen ihre Umgebung im wahren Licht sehen. Die visuelle Wahrnehmung war ein evolutionärer Vorteil im ewigen Selektionsprozess, dem „Survival of the Fittest“. Die anatomische Einzigartigkeit, die Kombination aus Sehen, aufrechtem Gang und damit frei verfügbaren Händen, gepaart mit den kognitiven Fähigkeiten des Gehirns, hatte dem Menschen kreative Schöpfungen ermöglicht. Irgendwann hatten die Menschen begonnen, das Gesehene auch wiederzugeben. Die anfänglichen Wandmalereien und Skulpturen wurden in der Antike durch Kunstwerke ersetzt, die einen erstaunlichen Realismus aufwiesen. Die handwerkliche Kunst ging mit einem Erkenntnisdrang einher. Ist das, was man sieht, auch das, was wirklich ist? Ist die Welt real oder virtuell und überhaupt erkennbar? Die ersten Überlegungen zum Sehen wiesen noch eine starke Analogie zum Tastsinn auf, wodurch das Sehen als ein Betasten der Dinge mit den Augen verstanden wurde. Die Abbildung im Auge erfolgt jedoch ohne Berührung. Die Augenlinse ist das Objektiv, das die Objekte auf die Netzhaut des Auges abbildet. Jede Abbildung ist immer die Projektion aus einer bestimmten Betrachtungsposition. Durch Veränderung der Position ändert sich auch die wahrgenommene Perspektive. Die Kenntnis der Perspektive wiederum erlaubt deren Konstruktion – auch ohne reale Vorlagen und damit die realistische Visualisierung virtueller Objekte.