

---

**eXamen.press**

Weitere Bände in dieser Reihe  
<http://www.springer.com/series/5520>

**eXamen.press** ist eine Reihe, die Theorie und Praxis aus allen Bereichen der Informatik für die Hochschulausbildung vermittelt.

---

Ralf Dörner · Wolfgang Broll  
Paul Grimm · Bernhard Jung  
(Hrsg.)

# Virtual und Augmented Reality (VR/AR)

Grundlagen und Methoden der Virtuellen  
und Augmentierten Realität

*Herausgeber*

Prof. Dr. Ralf Dörner  
Fachbereich Design, Informatik, Medien  
Hochschule RheinMain  
Wiesbaden  
Deutschland

Prof. Dr. Paul Grimm  
Fachbereich Angewandte Informatik  
Hochschule Fulda  
Fulda  
Deutschland

Prof. Dr. Wolfgang Broll  
Fakultät für Informatik und Automatisierung/  
Fakultät für Wirtschaftswissenschaften  
und Medien  
Technische Universität Ilmenau  
Ilmenau  
Deutschland

Prof. Dr. Bernhard Jung  
Fakultät für Mathematik und Informatik  
TU Bergakademie Freiberg  
Freiberg  
Deutschland

ISSN 1614-5216

ISBN 978-3-642-28902-6

DOI 10.1007/978-3-642-28903-3

ISBN 978-3-642-28903-3 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media  
[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)

---

## Geleitwort

Virtual Reality ist eine Zukunftstechnologie, die zunehmend an Bedeutung in einer Vielzahl von Anwendungsgebieten in Forschung und Industrie gewinnt. Durch die rasante Entwicklung von Displayhardware, neuen Interaktionsgeräten und Trackingsystemen, werden heute Virtual Reality Anwendungen entwickelt, die vor wenigen Jahren ausschließlich in großen Forschungslaboren realisierbar gewesen wären. Diese Technologierichtung wird in besonderem Maße durch deutsche Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen geprägt. Aus diesem Grund besteht ein Bedarf an einem deutschsprachigen Lehrbuch zur Ausbildung der nächsten Generation von Virtual Reality Spezialisten.

Das vorliegende Buch *Virtual Reality und Augmented Reality (VR/AR) – Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität* entstand aus einer Initiative von international führenden Experten der Fachgruppe Virtuelle Realität und Augmented Reality der Gesellschaft für Informatik (GI). Die Fachgruppe unterstützt neben der Etablierung von neuen Forschungsrichtungen auch die Förderung des Nachwuchses, indem sie sich mit fachdidaktischen Fragestellungen beschäftigt. Umfragen innerhalb der Fachgruppe haben nicht nur den Inhalt dieses Buches beeinflusst, auch viele der Autoren sind aktiv in der Fachgruppe engagiert.

Neben technischen Themen geht das Buch auch auf Aspekte der Wahrnehmung, der Mensch – Computer Interaktion und auf mathematische Grundlagen ein. Es schließt eine Lücke im deutschsprachigen Raum, indem es den aktuellen Stand der Forschung durch Grundlagen und anwendungsorientierte Beispiele fachdidaktisch aufbereitet.

Ich bin davon überzeugt, dass dieses Buch bei einer breiten Leserschaft großes Interesse wecken wird. Der Inhalt des Buches ist von hoher technischer Qualität und wird einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen Entwicklung dieser Disziplin leisten.

September 2013

Prof. Dr. Oliver Staadt  
Universität Rostock  
Sprecher der GI-Fachgruppe  
Virtuelle Realität und Augmented Reality

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	1
	Ralf Dörner, Bernhard Jung, Paul Grimm, Wolfgang Broll und Martin Göbel	
1.1	Worum geht es bei VR/AR? .....	1
1.1.1	Die perfekte Virtuelle Realität .....	2
1.1.2	Die Simulation der Welt .....	5
1.1.3	Suspension of Disbelief .....	7
1.1.4	Motivation .....	8
1.2	Was ist VR? .....	12
1.2.1	Technologieorientierte Charakterisierungen der VR .....	12
1.2.2	VR als innovative Form der Mensch-Maschine Interaktion .....	15
1.2.3	Mentale Aspekte der VR-Erfahrung .....	17
1.3	Historische Entwicklung der VR .....	19
1.4	VR/AR –Systeme .....	21
1.5	Benutzung des Buches .....	25
1.5.1	Aufbau des Buches .....	25
1.5.2	Benutzungsanleitung .....	26
1.5.3	Zielgruppen des Buches .....	26
	Lehrende im Bereich VR/AR .....	27
	Studierende .....	28
	Anwender oder solche, die es werden wollen .....	28
	Technologieaffine .....	29
1.6	Zusammenfassung und Fragen .....	29
	Literaturempfehlungen .....	30
	Literatur .....	31
<b>2</b>	<b>Wahrnehmungsaspekte von VR</b> .....	33
	Ralf Dörner und Frank Steinicke	
2.1	Menschliche Informationsverarbeitung .....	33
2.2	Visuelle Wahrnehmung .....	35
2.2.1	Stereosehen .....	36
2.2.2	Raumwahrnehmung .....	39

2.3	Multisensorische Wahrnehmung	43
2.3.1	Auditive Wahrnehmung	43
2.3.2	Haptische Wahrnehmung	44
2.3.3	Propriozeption und Kinästhesie	44
2.3.4	Bewegungswahrnehmung	45
2.3.5	Präsenz und Immersion	46
2.4	Phänomene, Probleme, Lösungen	46
2.4.1	Abweichende Betrachtungsparameter	47
2.4.2	Doppelbilder	48
2.4.3	Frame Cancellation	50
2.4.4	Vergence-Focus-Konflikt	51
2.4.5	Diskrepanzen in der Raumwahrnehmung	52
2.4.6	Diskrepanzen in der Bewegungswahrnehmung	55
2.4.7	Cybersickness	56
2.5	Nutzung von Wahrnehmungsaspekten	57
2.5.1	Salienz	57
2.5.2	Nutzerführung	60
2.6	Zusammenfassung und Fragen	60
	Literaturempfehlungen	61
	Literatur	61
<b>3</b>	<b>Virtuelle Welten</b>	<b>65</b>
	Bernhard Jung und Arnd Vitzthum	
3.1	Einführung	66
3.1.1	Vorüberlegung: Anforderungen an Virtuelle Welten	66
3.1.2	Erstellen der 3D-Objekte	67
3.1.3	Aufbereitung der 3D-Objekte für VR/AR	67
3.1.4	Integration der 3D-Objekte in VR/AR-Laufzeitumgebungen	68
3.2	Szenengraphen	68
3.3	3D Objekte	71
3.3.1	Oberflächenmodelle	72
	Polygonbasierte Repräsentationen	72
	Polygone	72
	Polygonnetze (Polygon Meshes)	72
	Triangle Strips	73
3.3.2	Festkörpermodelle	74
	Boundary Representations (B-Reps)	74
	Primitive Instancing	75
3.3.3	Erscheinungsbild	75
	Materialien	75
	Texturen	76
	Shader	77

3.3.4	Optimierungstechniken für 3D-Objekte .....	77
	Vereinfachung von Polygonnetzen .....	78
	Darstellung unterschiedlicher Detailgrade .....	78
	Texture Baking .....	78
	Billboards .....	79
3.4	Animation und Objektverhalten .....	80
3.4.1	Keyframe-Animation .....	80
3.4.2	Physikbasierte Animation starrer Körper .....	80
3.4.3	Objektverhalten .....	82
3.4.4	Verhalten und Animation in Szenengraphen .....	83
3.5	Beleuchtung, Sound und Hintergründe .....	83
3.5.1	Beleuchtung .....	84
3.5.2	Sound .....	84
3.5.3	Hintergründe .....	86
3.6	Spezialsysteme .....	86
3.6.1	Virtuelle Menschen .....	86
3.6.2	Partikelsysteme .....	88
3.6.3	Gelände .....	90
3.6.4	Vegetation .....	91
3.7	Zusammenfassung und Fragen .....	93
	Literaturempfehlungen .....	94
	Literatur .....	94
<b>4</b>	<b>VR-Eingabegeräte .....</b>	<b>97</b>
	Paul Grimm, Rigo Herold, Johannes Hummel und Wolfgang Broll	
4.1	Grundlagen .....	98
4.1.1	Anzahl der Freiheitsgrade pro verfolgtem Körper .....	100
4.1.2	Anzahl der gleichzeitig verfolgten Körper .....	100
4.1.3	Größe der überwachten Fläche bzw. des überwachten Volumens ...	100
4.1.4	Genauigkeit .....	101
4.1.5	Wiederholrate .....	101
4.1.6	Latenz .....	102
4.1.7	Drift .....	102
4.1.8	Empfindlichkeit gegenüber äußeren Rahmenbedingungen .....	103
4.1.9	Kalibrierung .....	103
4.1.10	Usability .....	103
4.2	Optisches Tracking .....	104
4.2.1	Markenbasierte Verfahren .....	104
4.2.2	Markenlose Verfahren .....	107
4.2.3	Outside-In-Verfahren .....	107
4.2.4	Inside-Out-Verfahren .....	109
4.2.5	Vergleich der optischen Tracking-Systeme .....	109



4.3	Weitere Eingabegeräte .....	110
4.3.1	3D-Mouse .....	110
4.3.2	Mechanische Eingabegeräte .....	110
4.3.3	Akustisches Tracking .....	111
4.3.4	Elektromagnetisches Tracking .....	112
4.3.5	Inertial-Tracker .....	112
4.3.6	Bewegungsplattformen .....	113
4.4	Finger-Tracking .....	114
4.5	Eye-Tracking .....	117
4.5.1	Bewegungsabläufe des Auges .....	117
4.5.2	Verfahren .....	117
4.5.3	Funktionsweise eines Eye-Trackers .....	120
4.5.4	Kalibrierung .....	121
4.5.5	Eye-Tracking in Head-Mounted Displays .....	122
4.5.6	Remote-Eyetracker .....	123
4.6	Zusammenfassung und Fragen .....	124
	Literaturempfehlungen .....	124
	Literatur .....	125
<b>5</b>	<b>VR-Ausgabegeräte .....</b>	<b>127</b>
	Paul Grimm, Rigo Herold, Dirk Reiners und Carolina Cruz-Neira	
5.1	Visuelle Ausgabe .....	129
5.1.1	Verwendete Technologien .....	129
5.1.2	Räumliche Darstellung .....	129
5.1.3	Aufbau von Displayssystemen mit mehreren Displays .....	132
5.2	Ausgabe über Tiled Displays .....	134
5.2.1	Geometrische Kalibration .....	137
5.2.2	Helligkeitsuniformität .....	138
5.2.3	Farbuniformität .....	141
5.2.4	Hard- und Software für die Bilderzeugung .....	141
5.2.5	Fazit .....	142
5.3	Head-Mounted Displays .....	142
5.3.1	Allgemeine Kenngrößen und Eigenschaften .....	142
5.3.2	Direktsicht-HMDs .....	147
5.3.3	Video-HMDs .....	149
5.3.4	See-Through-HMDs .....	150
5.3.5	Interaktive HMDs .....	151
5.4	Akustische Ausgabegeräte .....	154
5.5	Haptische Ausgabegeräte .....	154
5.6	Zusammenfassung und Fragen .....	155
	Literaturempfehlungen .....	156
	Literatur .....	156

<b>6</b>	<b>Interaktionen in Virtuellen Welten</b> .....	157
	Ralf Dörner, Christian Geiger, Leif Oppermann und Volker Paelke	
6.1	Grundlagen aus der Mensch-Computer-Interaktion .....	158
6.2	Selektion .....	160
6.2.1	Zeigen in Virtuellen Welten .....	160
6.2.2	Interaktionsgestaltung .....	162
6.2.3	Beispiele für Selektionstechniken .....	164
6.3	Manipulation von Objekten .....	165
6.4	Navigation .....	168
6.4.1	Steuerungstechniken zur Bewegungskontrolle .....	170
6.4.2	Walking als Technik zur Bewegungskontrolle .....	171
6.4.3	Leaning-Based Interfaces zur Bewegungskontrolle .....	173
6.4.4	Routenplan- und zielbasierte Bewegungstechniken .....	175
6.4.5	Entwurfskriterien für Navigationstechniken .....	176
6.5	Systemsteuerung .....	176
6.6	Prozesse für Design und Realisierung von VR-Interaktion .....	178
6.6.1	Besonderheiten von VR-Benutzungsschnittstellen .....	179
6.6.2	Nutzerorientierte Entwicklung von VR-Interaktionen .....	180
6.7	Nutzertests .....	183
6.8	Zusammenfassung und Fragen .....	190
	Literaturempfehlungen .....	191
	Literatur .....	192
<b>7</b>	<b>Echtzeitaspekte von VR-Systemen</b> .....	195
	Mathias Buhr, Thies Pfeiffer, Dirk Reiners, Carolina Cruz-Neira und Bernhard Jung	
7.1	Latenz in VR-Systemen .....	195
7.1.1	Welche Anforderungen an Latenz gibt es? .....	197
7.1.2	Wo entstehen eigentlich Latenzen? .....	198
7.1.3	Ist die Latenz in einem VR-System konstant? .....	200
7.1.4	Welche Ansätze zur Latenzbestimmung gibt es? .....	200
	Latenzbestimmung durch Berechnung .....	200
	Bestimmung der Latenz von Tracking-Systemen .....	203
	Bestimmung der Ende-zu-Ende-Latenz .....	205
7.1.5	Zusammenfassung Latenz .....	205
7.2	Effiziente Kollisionserkennung in Virtuellen Welten .....	206
7.2.1	Hüllkörper .....	207
	Axis-Aligned Bounding Box (AABB) .....	209
	Bounding Spheres .....	210
	Oriented Bounding Boxes (OBBs) .....	210
	Discrete-Oriented Polytope (k-DOPs) .....	212

7.2.2	Techniken zur Strukturbildung	213
	Bounding Volume Hierarchies	213
	Raumzerlegung und Binary Space-Partitioning-Trees	214
7.2.3	Kollisionserkennung für große Umgebungen	218
	Broad Phase Collision Detection	218
	Narrow Phase Collision Detection	220
7.2.4	Zusammenfassung und weitergehende Techniken	222
7.3	Echtzeit-Rendering Virtueller Welten	223
7.3.1	Algorithmische Strategien	224
	View Volume Culling	224
	Hierarchical View Volume Culling	226
	Occlusion Culling	226
	Backface Culling	228
	Small Feature Culling	228
	Portal Culling	228
	Level of Detail	229
7.3.2	Hardwarebezogene Strategien	230
	Objektgröße	231
	Indizierung	231
	Caching	232
	Stripping	233
	Minimierung von Zustandswechseln	234
7.3.3	Softwaresysteme für die Darstellung Virtueller Welten	235
	Szenengraphen	236
7.4	Zusammenfassung und Fragen	237
	Literaturempfehlungen	238
	Literatur	238
<b>8</b>	<b>Augmentierte Realität</b>	<b>241</b>
	Wolfgang Broll	
8.1	Einführung	241
8.1.1	Übersicht	241
	Videoaufnahme	242
	Tracking	242
	Registrierung	243
	Darstellung	243
	Ausgabe	243
8.1.2	Definition	245
8.1.3	Grundlegende Ausprägungen von AR	247
	Video See-Through-AR	248
	Optisches See-Through-AR	248
	Projektionsbasierte AR	249
	Vergleich der unterschiedlichen Ausprägungen von AR	250

---

8.2	Tracking	252
8.2.1	Mobiles Positions-Tracking	253
8.2.2	Sensorbasiertes mobiles Orientierungs-Tracking	255
8.2.3	Kamerabasiertes Tracking mit Marken	256
	Einsatz des Marken-Trackings	256
	Grundlegende Funktionsweise	257
	Intrinsische und extrinsische Kameraparameter	259
8.2.4	Merkmalsbasierte Tracking-Verfahren	261
	Geometriebasiertes Tracking	261
	Weitere merkmalsbasierte Tracking-Verfahren	261
8.2.5	Hybride Tracking-Techniken	263
8.3	Registrierung	264
8.3.1	Geometrische Registrierung	264
8.3.2	Photometrische Registrierung	268
8.4	Visuelle Ausgabe	270
8.4.1	Handheld-Geräte	271
8.4.2	Video-See-Through-Displays	271
8.4.3	Optische See-Through-Displays	273
	Optische See-Through-Displays mit semi-transparenten Spiegeln	274
	Prismenbasierte optische See-Through-Displays	275
	Retinale Datenbrillen	275
	See-Through-Displays mit integrierten optischen Elementen	276
	Auswirkungen unterschiedlicher Bauweisen	278
	Auswirkungen unterschiedlicher Displaykonfigurationen auf die Tiefenwahrnehmung	281
8.4.4	Projektionsbasierte Ausgabe	281
8.5	Spezielle AR-Techniken	282
8.5.1	Head-Up-Inhalte	283
8.5.2	Verdeckungen und Phantomobjekte	283
8.5.3	Überblenden von Marken	285
8.5.4	Virtuelle Löcher	285
8.6	Spezielle AR-Interaktionstechniken	285
8.6.1	Interaktion durch Navigation	286
8.6.2	Selektion durch Blickrichtung	287
8.6.3	Tangible User Interfaces	287
8.7	Applikationen	288
	Training und Wartung	288
	Fernsehübertragungen	289
	Militärische Applikationen	289
	Lehre, (Aus-) Bildung und Museen	289
	Architektur und Städteplanung	290
	Medizin	290
	Information, Navigation und Tourismus	290

	Archäologie und Geschichte .....	290
	Spiele und Unterhaltung .....	291
8.8	Zusammenfassung und Fragen .....	291
	Magic Lens .....	292
	Tracking .....	292
	Registrierung .....	292
	Displays .....	292
	Tangible Interfaces .....	292
	Phantomobjekte .....	292
	Literaturempfehlungen .....	293
	Literatur .....	293
<b>9</b>	<b>Fallbeispiele für VR/AR .....</b>	<b>295</b>
	Ralf Dörner, Geert Matthys, Manfred Bogen, Stefan Rilling, Andreas Gerndt, Janki Dodiya, Katharina Hertkorn, Thomas Hulin, Johannes Hummel, Mikel Sagardia, Robin Wolff, Tom Kühnert, Guido Brunnett, Hagen Buchholz, Lisa Blum, Christoffer Menk, Christian Bade, Werner Schreiber, Matthias Greiner, Thomas Alexander, Michael Kleiber, Gerd Bruder und Frank Steinicke	
9.1	Einführung und Übersicht .....	295
9.2	Die aixCAVE an der RWTH Aachen University .....	297
9.3	Virtuelle Realität in der Öl- und Gasindustrie .....	300
9.4	Virtuelle Satellitenreparatur im Orbit .....	303
9.5	Virtual Prototyping von Schuhen und Stiefeln .....	306
9.6	Augmentierte Realität zum Anfassen .....	310
9.7	Augmentierte Realität unter Wasser .....	311
9.8	Einsatz von Spatial Augmented Reality in der Automobilindustrie .....	313
9.9	Einsatz von Augmented Reality in der Fertigungsplanung .....	316
9.10	Augmentierte Realität und Print .....	318
9.11	Benutzerzentrierte Gestaltung eines AR-basierten Systems zur Telemaintenance .....	320
9.12	Effekte von Rendering-Parametern auf die Wahrnehmung von Größen und Distanzen .....	322
	Literatur .....	324
<b>10</b>	<b>Mathematische Grundlagen von VR/AR .....</b>	<b>327</b>
	Ralf Dörner	
10.1	Vektorräume .....	327
10.2	Geometrie und Vektorräume .....	329
10.3	Der affine Raum .....	330
10.4	Der euklidische Raum .....	331
10.5	Analytische Geometrie im $\mathbb{R}^3$ .....	333

---

10.6	Matrizen .....	334
10.7	Affine Abbildungen und Wechsel von Koordinatensystemen .....	335
10.8	Bestimmung von Transformationsmatrizen .....	337
	<b>Über die Autoren</b> .....	339
	<b>Sachverzeichnis</b> .....	345