

Teil I Theorie

1	Dimensionen der Realität	3
1.1	Virtuelle Welt	7
1.2	Immersion	9
1.3	Präsenz	9
1.3.1	Physische Präsenz	10
1.3.2	Soziale Präsenz	11
1.3.3	Persönliche Präsenz (Verkörperung)	11
1.4	Einteilung technischer Umgebungen	12
1.4.1	Ubiquitäre Systeme	13
1.4.2	Standortbezogene Dienste	14
1.4.3	Telepräsenz	15
1.4.4	Gemischte Realität	16
1.4.5	Reduzierte Realität	20
1.4.6	Ersetzende Realität	20
1.4.7	X-Reality	21
1.4.8	Virtuelle Realität	22
1.5	Das erweiterte Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum	24
1.5.1	Mentale Realität	24
1.5.2	Mentales Modell	25
1.6	Cyberspace und Metaversum	27
	Literaturverzeichnis	29
2	Künstliche Welten im historischen Überblick	31
2.1	Bilder, Stereoskopie und Panoramen (bis 1890)	31
2.1.1	1611: Dióptrik, Grundlagen der Lichtbrechung	32
2.1.2	1787: Panoramabild	32
2.1.3	1838: Stereoskopie	32

2.1.4	1839: Daguerreotypien	32
2.1.5	1849: Zweiobjektiv-Kamera und Prismen-Stereoskop	33
2.1.6	1862: Pepper's Ghost, erste AR-Anwendung	34
2.2	Bilder lernen Laufen (1890 bis 1950)	34
2.2.1	1895: Film erreicht breite Öffentlichkeit	34
2.2.2	1900: Cinéorama, erster Panoramafilm	34
2.2.3	1945: Stereoskopisches Fernsehgerät	35
2.3	Erste Realisierungen von VR-Systemen (1950 bis 1980)	35
2.3.1	1956: Sensorama	36
2.3.2	1960: Telesphere Mask, erstes HMD	36
2.3.3	1961: Headsight, erstes HMD mit Tracking	36
2.3.4	1965: Ultimate Display	38
2.3.5	1968: Sword of Damocles	38
2.3.6	1974: SIGGRAPH-Konferenzen	39
2.3.7	1976: VIDEOPLACE, soziale Interaktion im Virtuellen	39
2.3.8	1977: Sayre Glove, erster Datenhandschuh	39
2.3.9	1978: Movie Map	40
2.3.10	1979: LEEP-System, großes stereoskopisches Sichtfeld	40
2.4	Kommerzialisierung von VR (1980 bis 1990)	41
2.4.1	1980: Vicon, erstes kommerzielles Motion-Capture-System	41
2.4.2	1981: Silicon Graphics	41
2.4.3	1985: VPL Research	41
2.4.4	1985: Virtual Visual Environment Display (VIVED)	41
2.4.5	1989: Power Glove, Datenhandschuh für Spielkonsole	42
2.5	VR in Videospiel und Medienkunst (1990 bis 2000)	43
2.5.1	1990: W.Industries, erstes VR-System für öffentlichen Raum	43
2.5.2	1993: Die ersten VR-spezifischen Konferenzen	43
2.5.3	1993: Synthese akustischer Umgebungen	44
2.5.4	1993: SEGA VR, ein HMD, welches nie auf den Markt kam	44
2.5.5	1995: Virtual Boy	44
2.5.6	1995: Virtual Perambulator, virtuelle Bewegung in VR	44
2.5.7	1993: CyberGrasp, Force-Feedback-Handschuh	44
2.5.8	1995: The Golden Calf	45
2.5.9	1996: Öffentliche CAVE	45
2.5.10	1997: Window-into-Virtuality	45
2.5.11	1997: Ultima Online, das erste Mehrspieler-Online-Rollenspiel	45
2.5.12	1998: PanoramaKamera & PanoramaScreen	46
2.5.13	1999: ARTToolKit, Open-Source-Trackingbibliothek	46

2.6	VR erreicht großen Bekanntheitsgrad (2000 bis 2010).....	46
2.6.1	2003: Second Life, die erste 3D-Onlinewelt	47
2.6.2	2006: Wii Remote, 3D-Gestensteuerung	47
2.6.3	2010: Kinect, berührungslose 3D-Gestensteuerung	47
2.7	VR, gekommen, um zu bleiben (2010 bis 2020).....	48
2.7.1	2010–2014: Oculus Rift	48
2.7.2	2012/2013: Lytro, Lichtfeldfotografie.....	48
2.7.3	2013: Leap Motion Controller, kostengünstiges Finger-Tracking	49
2.7.4	2013–2016: Omni & Virtualizer, kostengünstige Bewegungsplattformen.....	49
2.7.5	2014: Cardboard & Gear VR, kostengünstiges VR.....	49
2.7.6	2015: VR Coaster	50
2.7.7	2016: VIVE, erschwingliche VR für Forschung und Wirtschaft	50
2.7.8	2016: PlayStation VR, weite Verbreitung im Spieleumfeld.....	50
2.7.9	2019: Beat Saber, erster VR-Blockbuster	50
2.8	VR etabliert sich (ab 2020)	51
2.8.1	2020: Videokonferenzen werden Alltag.....	51
2.8.2	2021: Vorlesungen in immersiver VR	51
	Literaturverzeichnis.....	52
3	Wie wir die Welt wahrnehmen	55
3.1	Visuelle Wahrnehmung	57
3.1.1	Bildentstehung im Auge	57
3.1.2	Akkommodation (Scharfstellung)	58
3.1.3	Konvergenz	59
3.1.4	Hell-Dunkel-Adaptation	60
3.1.5	Farbwahrnehmung	61
3.1.6	Bildliche und zeitliche Auflösung des Auges.....	62
3.1.7	Gesichtsfeld, Blickfeld und Sichtfeld	63
3.1.8	Visuelle Überforderung	64
3.1.9	Parallaxe, Disparität und Stereopsis.....	64
3.1.10	Raumwahrnehmung	68
3.2	Auditive Wahrnehmung	72
3.2.1	Eigenschaften des Hörens.....	73
3.2.2	Binaurales Hören	75
3.2.3	Wahrnehmung der horizontalen Schalleinfallrichtung	76
3.2.4	Wahrnehmung der vertikalen Richtung	78
3.2.5	Mögliche Fehler in der Richtungswahrnehmung	79

3.2.6	Wahrnehmung der Distanz.....	79
3.2.7	Wahrnehmung von Raumeigenschaften.....	80
3.3	Somatosensorische Wahrnehmung	80
3.3.1	Berührung	81
3.3.2	Propriozeption	83
3.4	Vestibuläre Wahrnehmung (Gleichgewichtssinn).....	83
3.5	Multimodale Sinneswahrnehmung	85
	Literaturverzeichnis.....	86
4	Gesundheitliche und soziale Aspekte	89
4.1	Cyberkrankheit	90
4.1.1	Unnatürliche Szenenbewegung	90
4.1.2	Theorie der Sinneskonflikte.....	91
4.1.3	Mögliche Auswirkungen auf den Sehapparat	91
4.1.4	Nachwirkungen und Wiederanpassung	93
4.2	Mechanische Belastung und hygienische Herausforderung.....	94
4.2.1	Gewicht, Sitz und Passform des Headsets	95
4.2.2	Verletzungsrisiko	95
4.2.3	Hygiene	97
4.3	Außerkörperliche Erfahrung	98
4.4	Belästigung	99
4.5	Sucht nach VR.....	100
4.6	Datenschutz.....	101
4.7	Manipulation und verstörende Inhalte.....	101
4.8	Altersempfehlung	102
	Literaturverzeichnis.....	104
5	Interaktion	107
5.1	Grundlagen des Interaktionsdesigns.....	109
5.1.1	Entdeckbarkeit.....	110
5.1.2	Angebotscharakter	110
5.1.3	Hinweisreiz	111
5.1.4	Rückmeldung.....	112
5.1.5	Abbildung	112
5.1.6	Beschränkung des Interaktionsspielraums	115
5.1.7	Prinzip des geringsten Aufwandes	116
5.1.8	Gorilla-Arm-Syndrom	117
5.2	Interaktionsformen	118
5.2.1	Interaktionsmetaphern	118
5.2.2	Realistische und unrealistische Interaktion	119
5.2.3	Direkte, indirekte und agentenbasierte Interaktion	120
5.2.4	Egozentrische und exozentrische Interaktion	121

5.2.5	Explizite und implizite Interaktion	122
5.2.6	Gestenerkennung und -interaktion	123
5.3	Eingabegeräte für immersive Umgebungen	125
5.3.1	Freiheitsgrade & Koordinaten	126
5.3.2	Interaktionsaufgaben in der immersiven VR	127
5.3.3	Anforderungen an das Eingabegerät	128
5.3.4	Hand-Eingabegeräte	129
5.3.5	Anwendungsspezifische Eingabegeräte	130
5.3.6	Eingabegeräte selbst entwickeln	130
5.4	Einhändige Interaktionstechniken	131
5.4.1	Virtuelle Hand-Interaktionstechnik	132
5.4.2	Go-Go-Interaktionstechnik	132
5.4.3	Raycasting-Interaktionstechnik	133
5.4.4	Okklusion-Interaktionstechnik	137
5.4.5	Welt-im-Kleinen-Interaktionstechnik	138
5.4.6	HOMER-Hybrid-Interaktionstechnik	139
5.4.7	Scaled-World-Grab-Hybrid-Interaktionstechnik	140
5.5	Zweihändige Interaktionstechniken	141
5.5.1	Griffleistenmetapher	142
5.5.2	Voodoo-Puppen-Interaktionstechnik	143
5.6	Freihändige Interaktionstechniken	144
5.6.1	Blickrichtung & Kopforientierung	145
5.6.2	Stimme & Sprache	145
5.6.3	Gehirnschnittstellen	147
5.7	Vergleich der Eingabemodalitäten	148
	Literaturverzeichnis	149
6	Benutzungsoberfläche	153
6.1	Referenzrahmen	154
6.1.1	Bezugssystem der realen Welt	155
6.1.2	Bezugssystem der virtuellen Welt	156
6.1.3	Kopf-Bezugssystem	156
6.1.4	Freischwebendes Bezugssystem	158
6.1.5	Hand-Bezugssystem	158
6.1.6	Torso-Bezugssystem	160
6.1.7	Objekt-Bezugssystem	160
6.2	Platzierung von Informations- und Interaktionskomponenten	161
6.3	Grafische Menüs im virtuellen Raum	164
6.3.1	2D-Menüs	166
6.3.2	Ringmenüs	167
6.3.3	Tortenmenüs	167

6.3.4	Finger-Menüs	168
6.3.5	3D-Widgets	169
6.4	Gestaltungsempfehlungen für grafische Schnittstellen	170
	Literaturverzeichnis	172
7	Fortbewegung	173
7.1	Kategorisierung der Bewegungsmethoden	174
7.1.1	Bewegungsarten	174
7.1.2	Bewegungsräume	175
7.1.3	Bewegungsmethoden	176
7.2	Autonome Fortbewegung	178
7.2.1	Fahr-Metapher	178
7.2.2	Schnitt-Metapher	179
7.3	Künstliche Fortbewegung	180
7.3.1	Controllersteuerung	180
7.3.2	Blickgeführte Steuerung	181
7.3.3	Zeigetechnik	182
7.3.4	Lehntechnik	182
7.3.5	Teleportation	182
7.3.6	Miniaturkarten	184
7.4	Physische Fortbewegung	184
7.4.1	Natürliches Laufen	185
7.4.2	Simuliertes Laufen	185
7.4.3	In-die-Luft-Greif-Technik	186
7.4.4	Laufbänder und Tretmühlen	187
7.4.5	Um gelenktes Laufen	188
7.4.6	Unmögliche Räume	191
7.5	Reduktion fortbewegungsausgelöster Cyberkrankheit	191
7.5.1	Vermeiden von virtueller Bewegung	193
7.5.2	Ruherahmen	194
7.5.3	Dynamische Beschränkung des Sichtfeldes	195
7.6	Vergleich zwischen Bewegungsmethoden	196
	Literaturverzeichnis	198

Teil II Technologie

8	Erfassung des Nutzers	203
8.1	Sensorik	205
8.2	Erfassung der Kopfposition und -rotation	207
8.3	Erfassung der Hände und Finger	208
8.3.1	Handmodell	208
8.3.2	Mögliche Probleme der Handerfassung	209

8.3.3	Handgehaltene Controller.....	211
8.3.4	Datenhandschuhe.....	211
8.3.5	Optische Hand- und Fingererkennung	212
8.3.6	Elektromyographiebasierte Handgestenerkennung	212
8.3.7	Korrektur der Handdarstellung	213
8.4	Erfassung des Körpers	214
8.4.1	Körpermodell	215
8.4.2	Inertialsensorbasierte Erfassung	215
8.4.3	Markerbasierte Erfassung	215
8.4.4	Markerlose Erfassung	217
8.5	Augen- und Blickerfassung	219
8.6	Gesichtserfassung	221
8.6.1	Erkennen der oberen Gesichtsmerkmale	223
8.6.2	Erkennen der unteren Gesichtsmerkmale	224
8.6.3	Fusion der unteren und oberen Gesichtsmerkmale	225
	Literaturverzeichnis.....	226
9	Tracking	229
9.1	Positionsbestimmung	230
9.2	Tracking	230
9.2.1	Trackingfehler und ihre Auswirkungen	231
9.2.2	Kalibrierung	232
9.3	Inertiales Tracking	233
9.4	Optisches Tracking	235
9.4.1	Markerbasiertes Tracking	236
9.4.2	Markerloses Tracking	236
9.4.3	Unprepared Tracking.....	237
9.5	Outside-In, Inside-Out und Inside-In Tracking	238
9.5.1	Outside-In Tracking	239
9.5.2	Inside-Out Tracking	239
9.5.3	Lighthouse Tracking	240
9.5.4	Inside-In Tracking.....	242
9.5.5	Vergleich zwischen den Trackingvarianten	242
9.6	Skelettverfolgung.....	243
9.7	Zustandsschätzung	245
9.7.1	Sequenzielle Bayes'sche Schätzung	245
9.7.2	Kalman-Filter.....	248
9.8	Sensorfusion	248
	Literaturverzeichnis.....	250
10	Ausgabesysteme	251
10.1	Visuelle Ausgabe	252

10.1.1	Kontaktlinsen-Displays	252
10.1.2	Kopfbasierte Displays	253
10.1.3	Aufbau und Formfaktor	256
10.1.4	Objektivverzeichnung	260
10.1.5	Variable Bildschirmauflösung (Foveated Imaging)	263
10.1.6	Variable Bildschirmdistanz	264
10.1.7	Handgehaltene Displays	264
10.1.8	Stationäre Displays	264
10.1.9	Darstellung stereoskopischer Bilder	267
10.1.10	Vermeidung visueller Überforderung	268
10.2	Akustische Ausgabe	271
10.2.1	Schallausbreitung	273
10.2.2	Kopfbezogene Übertragungsfunktion	274
10.2.3	Wellenfeldsynthese	277
10.3	Haptische Ausgabe	278
10.3.1	Vibration	281
10.3.2	Oberflächenvariation und -simulation	282
10.3.3	Hautverformung	282
10.3.4	Krafrückkopplung	283
10.3.5	Berührungsfreie Haptik	284
10.4	Vestibuläre Ausgabe	286
10.5	Olfaktorische Ausgabe	288
	Literaturverzeichnis	289

Teil III Anwendung

11	Filmische virtuelle Realität	293
11.1	Die Rolle des Nutzers	295
11.1.1	Passiver Beobachter	296
11.1.2	Aktiver Beobachter	296
11.1.3	Passiver Teilnehmer	296
11.1.4	Aktiver Teilnehmer	296
11.2	Regie für filmische virtuelle Realität	297
11.2.1	Lenkung der Aufmerksamkeit	298
11.2.2	Szenenwechsel	300
11.3	Besonderheiten bei sitzender Betrachtung	301
11.4	Erstellen von 360°-Videos	302
11.4.1	Stereoskopisches 360°-Video	303
11.4.2	Stitching	306
11.4.3	Stitchingfehler	308
	Literaturverzeichnis	309

12 Soziale virtuelle Realität	311
12.1 Verkörperung	313
12.1.1 Darstellung von Menschen	314
12.1.2 Unheimliches Tal	315
12.2 Soziale Präsenz und Verhalten	317
12.2.1 Proxemik	318
12.2.2 Proteus-Effekt	319
Literaturverzeichnis	320
13 Immersives Lernen	323
13.1 Bildung mentaler Modelle	325
13.1.1 Differenzen zwischen mentalen Modellen	325
13.1.2 Transferleistung	327
13.2 Bereiche des immersiven Lernens	329
13.2.1 Trainingswelten	329
13.2.2 Konstruktionswelten	330
13.2.3 Explorationswelten	330
13.2.4 Experimentalwelten	330
13.2.5 Expositionswelten	330
13.2.6 Lehrwelten (immersive Lehre)	331
13.3 Faktoren, die das Lernen in VR fördern	331
Literaturverzeichnis	334
14 VR-Spiele	337
14.1 Besonderheiten von VR-Spielen	338
14.2 VR-Spielmechaniken	339
14.2.1 Onboarding	340
14.2.2 Informationselemente	341
14.2.3 Interaktionen	341
14.2.4 Fortbewegung	342
Literaturverzeichnis	343
15 Standortbezogene virtuelle Realität	345
15.1 Nutzerakzeptanz und -beteiligung	346
15.1.1 Sprung ins Ungewisse	347
15.1.2 Zuschauerblindheit	348
15.1.3 Umgebungsblindheit	348
15.1.4 Soziale Isolation des Nutzers	348
15.2 Publikumstrichter	349
15.3 Gestaltungsempfehlungen für die Inszenierung ortsbezogener virtueller Realität	351
Literaturverzeichnis	352

16 Immersive Entwicklung	353
16.1 Kollaboratives Design	354
16.2 3D-Modellierung	355
16.3 Prototyping	355
16.4 Produktbewertung	356
16.5 Herausforderungen	357
16.5.1 Herausforderungen der Datenaufbereitung	357
16.5.2 Herausforderungen in der Dateninteraktion	357
Literaturverzeichnis	358
17 Forschungsgegenstand und -tool	361
17.1 Forschungsethik	362
17.2 Reproduzierbarkeit, Replizierbarkeit und Validität	364
17.2.1 Reproduzierbarkeit	364
17.2.2 Replizierbarkeit	364
17.2.3 Validität	365
17.3 Erfassen des Nutzerzustands	365
17.3.1 Zusätzliche Sensorik	366
17.3.2 Befragungsmethoden	366
17.4 Messen von Präsenz	368
17.4.1 Selbstbericht-Fragebögen zu Präsenz	368
17.4.2 Physiologische Merkmale zum Messen von Präsenz	370
17.5 Messen von Cyberkrankheit	371
17.5.1 Selbstbericht-Fragebögen zu Cyberkrankheit	371
17.5.2 Physiologische Merkmale zum Messen von Cyberkrankheit	373
Literaturverzeichnis	373
Stichwortverzeichnis	377