



DIPLOMARBEIT AN DER
UNIVERSITÄT DER KÜNSTE BERLIN

Virtual-Reality-Aided Architectural Design (VRAAD)
*eine Annäherung an kultur-
und naturwissenschaftliche Parameter*

Robert Patz
Matrikelnummer 361089
post@robert-patz.de

Berlin, der 10. April 2015

betreut durch

Prof. Dr. Christoph Gengnagel
FACHGEBIET KONSTRUKTIVES
ENTWERFEN UND TRAGWERKSPLANUNG
UNIVERSITÄT DER KÜNSTE BERLIN

Prof. Dr. Susanne Hauser
FACHGEBIET KUNST-
UND KULTURGESCHICHTE
UNIVERSITÄT DER KÜNSTE BERLIN

Prof. Dr. Norbert Palz
FACHGEBIET DIGITALES UND
EXPERIMENTELLES ENTWERFEN
UNIVERSITÄT DER KÜNSTE BERLIN

Prof. Constance Scharff, Ph.D.
INSTITUT FÜR BIOLOGIE
FACHGEBIET VERHALTENSBIOLOGIE
FREIE UNIVERSITÄT BERLIN

mit Unterstützung von

cand. M.F.A. Marcel Karnapke
VIRTUAL REALITY AND
VISUALIZATION RESEARCH LAB-
BAUHAUSUNIVERSITÄT WEIMAR

Dipl.-Des. Alexander Kulik
VIRTUAL REALITY AND
VISUALIZATION RESEARCH LAB
BAUHAUSUNIVERSITÄT WEIMAR

Alexander Hey und Paul Dahlke
PLAN 3D LASERSCAN + MODELL BERLIN

Titelbild

Virtuelle Architekturfotografie im digitalen Modell der Haupthalle der UdK Berlin.
Motiv: Niklas Goldbach; Modell, Belichtung und Nachbearbeitung: Verfasser

Vorwort

Das von mir im Herbst 2014 begonnene Projekt befasst sich mit zwei Fragen. Erstens: Wie kann eine bessere Einbindung subjektiver, zeitlich-räumlicher Wahrnehmung im gegenwärtigen Entwurfs- und Planungsprozess von Architekten verwirklicht werden? Und zweitens: Wie kann die Technologie *Virtual Reality* (VR) dabei helfen?

Meiner Beobachtung nach wird sich in der Praxis zusehends auf effiziente computergestützte Verfahren der Abbildung von Architektur und der Arbeit an ihr verlassen. Meines Erachtens besteht dabei die Gefahr, dass ein tieferes Verständnis von Raum und seiner potenziellen Qualitäten vernachlässigt wird. Weil ich nicht glaube, dass sich dahingehend einmal veränderte Prozesse rückwirkend entschleunigen lassen, habe ich für eine Lösung des Problems den Blick auf die Anwendung der VR und ihre Integration in die Entwurfsarbeit gerichtet. Die Anfangshypothese war, dass sich mithilfe dieser Technologie Wahrnehmung besser in kreatives Denken und dadurch in konkrete Entwürfe umsetzen lässt.

Meine Diplomarbeit beschäftigt sich mit drei Themenbereichen: der Herausarbeitung konzeptioneller Unterschiede zwischen einerseits manuellen und computergestützten Methoden des Entwerfens und andererseits der Möglichkeit des immersiven Arbeitens in virtuellen Umgebungen; der Relevanz dieser Unterschiede für die Überprüfung und Vermittlung von Entwurfs- und Planungsprozessen; sowie den, sich aus den vorgenannten Punkten ergebenden, konkreten Vorschlägen und Anforderungen für zukünftige Anwendungen.

Beginnend mit der Betrachtung klassischer und computergestützter Entwurfsmethoden der Architektur und bestehender Anwendungen aus dem Bereich *Virtual-Reality-Aided Design*, sowie Interfaces kreativer Interaktion, will diese Arbeit geeignete Ansätze in einem theoretischen Teil herausstellen. Durch die VR werden eine Reihe von Wahrnehmungsprozessen auf eine neue Weise in Architekturentwurf und Architekturdarstellung integriert. Deswegen wird ein Überblick über Wahrnehmungsprozesse einbezogen. Im anschließenden empirischen Teil wurden anhand eines Experiments Teilaspekte der VR auf ihre Tauglichkeit hin untersucht. Die Frage nach der Validität einer virtuellen Repräsentation von Raum stand dabei im Vordergrund.

Für die Genese dieser Repräsentation eines Realraums und die Gegenüberstellung verschiedener Darstellungsmethoden wurden neue Wege effizienter technologischer Implementierungen untersucht und beschrritten. Übergeordnetes Ziel war die Annäherung an eine hypothetische, ideale Anwendung.

Inhalt

1.	ARCHITEKTUR ENTWERFEN	5
1.1.	Kreatives Denken	5
1.2.	Der Prozess des Entwerfens	5
1.3.	Traditionelle Werkzeuge	7
1.4.	Defizite traditioneller Werkzeuge	9
1.5.	Der Computer	11
1.6.	Defizite computergestützter Werkzeuge	14
2.	WAHRNEHMUNG UND KÖRPERWISSEN	17
2.1.	Sehen und Raumwahrnehmung	17
2.2.	Bewegungswahrnehmung	20
2.3.	Propriozeption und Kinästhesie	21
2.4.	Haptik und Oberflächensensibilität	22
2.5.	Hören	22
2.6.	Verbale Kommunikation und manuelle Gesten	23
2.7.	Korrektive des Sehens	24
3.	VIRTUAL REALITY	26
3.1.	Wahrnehmungsaspekte	27
3.1.1.	Immersion und Präsenz	28
3.1.2.	Salienz	29
3.1.3.	Cybersickness	29
3.1.4.	Diskrepanzen der Raum- und Bewegungswahrnehmung	30
3.2.	Immersive Entwurfsumgebungen	31
3.2.1.	Defizite	32
3.2.2.	Verfügbarkeit	32
3.3.	Die hypothetische Anwendung – offene Fragen	36
3.3.1.	Skalierung, Maßstab und Orientierung	36
3.3.2.	Selektion und Interaktion	38
3.3.3.	Darstellung	40
3.3.4.	Ergonomie	40
4.	EXPERIMENT	42
4.1.	Fragestellung	43
4.2.	Methode	43
4.2.1.	Probanden	44
4.2.2.	Ort	45
4.2.3.	Technische Implementierung	47
4.2.4.	Darstellung	48
4.2.5.	Ablauf und Auswertung	49
4.3.	Ergebnisse	51
4.4.	Diskussion	53
5.	AUSBLICK UND SCHLUSSWORT	54
5.1.	Danksagung	55
6.	VERWENDETE LITERATUR, ABBILDUNGEN	56
7.	ANHANG	59

1. Architektur entwerfen

Der Entwerfer¹ erforscht das In-Existente, um das Beispiellose hervorzubringen.² Doch was sind die relevanten Einflussfaktoren dieser Arbeit im Kontext der Architektur? Im folgenden Kapitel werde ich – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – jene benennen und definieren, die mir im Hinblick auf das Thema meiner Arbeit als besonders wichtig erscheinen.

1.1 Kreatives Denken

»Intuition favors the prepared mind«³ – dieses Zitat des Neurowissenschaftlers António Damásio könnte kaum treffender formuliert sein. Es bringt zwei wesentliche Einflussfaktoren der Kreativität auf den Punkt: Beim *prepared mind* handelt es sich um einen klugen Kopf, der angesichts der bevorstehenden Aufgabe das vorhandene Wissen in neue Zusammenhänge bringt. *Intuition* ist die Fähigkeit, Einsichten, Sichtweisen und Gesetzmäßigkeiten ohne den bewussten Gebrauch des Verstandes in einem Fluss freizusetzen und damit die subjektive Stimmigkeit von Entscheidungen zu erlangen. Intuition als wesentlicher Bestandteil von Kreativität bringt also mit sich, dass es sich bei Kreativität um eine Synthese von sowohl intuitiven als auch analytischen Fähigkeiten handelt, die eine Neu- oder Re-Kombination von Wissen erfordert und erregt.

»THE CREATIVE PROCESS IS A COCKTAIL OF INSTINCT, SKILL, CULTURE AND A HIGHLY CREATIVE FEVERISHNESS. IT IS NOT LIKE A DRUG; IT IS A PARTICULAR STATE WHEN EVERYTHING HAPPENS VERY QUICKLY, A MIXTURE OF CONSCIOUSNESS AND UNCONSCIOUSNESS, OF FEAR AND PLEASURE; IT'S A LITTLE LIKE MAKING LOVE, THE PHYSICAL ACT OF LOVE.«⁴

1.2. Der Prozess des Entwerfens

Die Besonderheit des architektonischen Entwerfens ist wegen des Ziels, physischen Raum zu schaffen, die iterative Verschränkung von entwerfender und planender Tätigkeit. *Entwerfen* meint die Genese von Ideen und Konzepten. *Planung* bezeichnet zumeist sowohl die technische Präzisierung und Darstellung von Entwurfsobjekten mit dem Ziel der baupraktischen Ausführung als auch die

¹ Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichwohl für beiderlei Geschlecht.

² Vgl. auch Krauthausen, Karin: Vom Nutzen des Notierens. In: Krauthausen, K. und Omar W. Kasim (Hrsg.): Notieren – Skizzieren. Schreiben und Zeichnen als Verfahren des Entwurfs, 2010

³ Damásio, António: *Descartes Error. Emotion, reason and the human brain*. Random House, New York, 2008, unter Berufung auf das Zitat einer Vorlesung Louis Pasteurs: »Dans les champs de l'observation le hasard ne favorise que les esprits préparés.«, Universität Lille (7.12.1854)

⁴ Francis Bacon über den kreativen Prozess

zeitliche Strukturierung baupraktischer Abläufe, jeweils unter Einbeziehung der Interessen anderer. Als ingenieurtechnische Leistung verschreibt sich die Architektur der Lösung von konkreten Problemen, wodurch sie sich von der Kunst abgrenzt.

Wie ein Jongleur hält der Architekt angesichts der Leerstelle, die er auszufüllen beauftragt ist, unzählige Bälle in der Luft: Ökonomische und rechtliche Forderungen müssen genauso befriedigt werden, wie ein möglichst ausgewogenes Verhältnis zwischen den Ansprüchen zukünftiger Nutzer und jenen der Öffentlichkeit. Er muss das Nutzungsverhalten projizieren und dabei dem Selbstbild der beteiligten Akteure entsprechen. »Ethische und ästhetische Prämissen, grundlegende Einstellungen zu Natur und Kultur manifestieren sich in Entwürfen ebenso, wie die Berücksichtigung oder Nicht-Berücksichtigung von Theorien, Befunden und Überlegungen zu ökologischen Fragen. [...] Die Verfügbarkeit von Materialien oder Technologien [kann] Entwürfe entscheidend prägen und [wird] in ihnen verarbeitet oder ignoriert. [...] Manche Aspekte, die für einen Entwurf prägende Bedeutung haben, *entscheiden sich* auch dadurch, dass sie so selbstverständlich sind, dass sie sich einer Thematisierung entziehen.«⁵

Im architektonischen Entwurfsprozess können drei Hauptphasen unterschieden werden: In der ersten Phase werden die zugrundeliegenden Daten und die Auflagen zusammengestellt, die zusammengefasst als Bedingungen des Entwurfs gelten. In der zweiten Phase beginnt der Entwerfer mit der Suche nach Lösungen für das Entwurfsproblem. Er entwickelt bei diesem Schritt zunächst mentale Modelle der erwarteten Lösungen. Seine Gedanken externalisiert er daraufhin mithilfe stellvertretender, meist nur ihm vollständig verständlicher, grafischer Symbole (auch: Zeichen). Seine Arbeit besteht vor allem darin, diese Darstellungen umzustellen und umzuformen. Die Intention bleibt dabei mehrdeutig, bis der Entwurf auf die nächste Stufe gehoben wird, in der das Wissen über die Lösungen gewachsen ist, und er mit größerer Präzision vorgehen kann. In dieser dritten Phase stellt die Verwendung eines Repertoires nun allgemein gültiger, grafischer Repräsentationen sicher, dass die Mehrdeutigkeit aufgehoben ist und die Vermittlung des Entwurfs an am Prozess beteiligte Parteien möglich wird.⁶

Betrachtet man die Gesamtheit dieser Prozesskette, lassen sich zwei Arten von Aktivitäten unterscheiden: zum einen, die gestaltende – aktive – Handlung der

⁵ Hauser, Susanne: Verfahren des Überschreitens. In: Ammon, Sabine und Eva Maria Froschauer (Hrsg.): Wissenschaft Entwerfen. Vom forschenden Entwerfen zur Entwurfsforschung der Architektur. Fink München, 2013, S. 364f.

⁶ Vgl. auch: Okeil, Ahmad: Hybrid Design Environments. Immersive and Non-Immersive Architectural Design, ITcon, Vol. 15, 2010, S. 202

Schöpfung und Beurteilung von Ideen oder Konzepten, zum anderen die beschreibende – passivere – Handlung, der vor allem grafischen Kommunikation entstandener Informationen zum Zweck der Vermittlung ausformulierter Entwürfe an andere.⁷ Idealerweise durchläuft der Entwurfsprozess die oben beschriebenen Phasen mehrfach. Durch wiederholende Bearbeitung wird die Dichte der Informationen größer, und es wächst die Qualität der Lösungen. Weil ein Entwurf in jedem Durchlauf erneut anhand der bereits angeführten Prämissen geprüft wird, sollten die Durchläufe an sich möglichst ungehemmt erfolgen. Um den Prozess nicht zu hemmen, ist es wünschenswert, dass der Fluss der Ideen und Konzepte durch die verwendeten Techniken so intuitiv und natürlich (oder beiläufig) wie möglich erfasst wird.

1.3. Traditionelle Werkzeuge

Der Architekt benötigt Werkzeuge zum Entwerfen. In der Konzeptphase des Entwurfsprozesses ist das Skizzieren ein gebräuchliches Medium der Arbeit. Selten tritt der Entwerfende mit einer fertigen Vorstellung im Kopf an den Zeichentisch.⁸ Versatzstücke sind zumeist die persönliche Erfahrung von Raum, ein Körperwissen, und ein Architekturwissen, dass aus zahllosen Referenzen und dem Verständnis formaler Beschreibbarkeit von Architektur, der Geometrie besteht. »Geometrie ist [das] vom Menschen [geschaffene] Ordnungssystem, um Formen begreifbar und erfassbar zu machen. Ihr kann die Rolle eines sinnlichen Ordnungsfaktors zugewiesen werden.«⁹

Gabriela Goldschmidt identifiziert zwei Absichten des Skizzierens: Einerseits können bereits im Kopf befindliche Gedanken mithilfe grafischer Repräsentationen beschrieben werden, andererseits können gerade während des Skizzierens neue Ideen entstehen.¹⁰ Diese Unterscheidung ließe sich erweitern: Skizzieren ist eine Technik, die sowohl zur Visualisierung, Untersuchung und Überprüfung als auch zur Korrektur und Überarbeitung taugt. »Entwerfer nehmen auf, reißen an, bessern aus, verfolgen variieren und antworten.«¹¹ Dank der Möglichkeit einer schnellen Wiederholung des Kreislaufs aus Abbildung und Rückinformation entspricht diese Technik der rekursiven Natur des Entwurfsprozesses. Mit der

⁷ Okeil, Ahmad: Hybrid Design Environments. Immersive and Non-Immersive Architectural Design, ITcon, Vol. 15, 2010, S. 202

⁸ Robbins, Edward und Edward Cullinan: Why architects draw. MIT press Cambridge, 1994

⁹ Leopold, Cornelia: Geometrische Grundlagen der Architekturdarstellung. Vierweg+Teubner Wiesbaden, 2013, S. 12

¹⁰ Goldschmidt, Gabriela: On Visual Design Thinking. The Vis Kids of Architecture. Design Studies 15, 1994, S. 158 f.

¹¹ Hasenhütl, Gerd: Zeichnerisches Wissen, in Gethmann, Daniel und Susanne Hauser (Hrsg.): Kulturtechnik Entwerfen. Praktiken, Konzepte und Medien in Architektur und Design Science. [transcript] Bielefeld, 2009, S. 342

Wiederholung wird das gedankliche Modell stabilisiert. Skizzieren regt den kreativen Prozess aber auch aufgrund der Verbindung seiner drei Komponenten an: der visuellen, der mentalen und der psychomotorischen: »Zeichnen beinhaltet einen permanenten Lernprozess durch die aufmerksame Verfolgung von Bewegungen der Hand und der Reflexion visueller Wahrnehmungen.«¹²

Karin Krauthausen schließt das Entwerfen in die wissenschaftlichen und künstlerischen Forschungsprozesse ein, die auf der Grundlage von Experimenten stattfinden. Das Skizzieren wird von ihr als eigenständige Kulturtechnik isoliert. Die Aussage: »[Die] Einrichtung [von Experimenten] zielt auf die Provokation eines Möglichkeitsraums, dessen Reglementierung nur grade so weit gehen darf, dass Anschlüsse wahrscheinlich werden, zum Beispiel Rekursionen und Transformationen« charakterisiert auch den inkrementellen Vorgang des wiederholten Skizzierens.¹³

Die skizzenhafte Beschreibung und die auf dieser Grundlage stattfindende Erforschung des Entwurfs umfasst außerdem die Nutzung zumeist ebenso grober, plastischer Arbeitsmodelle. Sie dienen der Veranschaulichung räumlicher Verhältnismäßigkeiten. Die physischen Modelle können in jedwedem Maßstab konstruiert werden, die Entscheidungs- und Formfindung kann direkt an ihnen vorgenommen werden.

Eine besondere Qualität sowohl des Modellbaus als auch des Skizzierens ist die Unschärfe. Im Modellbau stellt das visuelle Symbol eines idealen Quaders als Beispiel möglicherweise die einfachste Form der präzisen Wiedergabe einer unscharfen Hypothese bereit.¹⁴ Geometrische Abstraktion ist ein intuitiv verständliches Mittel, um unscharfes Wissen auszudrücken. Gleiches trifft für Skizzen zu, die zumeist von unfertiger, grober Anmutung sind. Sie vermitteln ihre Intention ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit. Die ihnen innenwohnende Form der Abstraktion drängt die Fragen nach den Spezifikationen jedes einzelnen Details zurück. Mehrdeutigkeit erlaubt die Offenlassung konkreter Antworten für eine spätere Isolierung und Bearbeitung von Details. Gerade durch das Auslassen von Informationen wird eine anhaltende Neuinterpretation erzwungen, die dem Entwerfer bei der Ideen- und Konzeptfindung und der Spezifizierung seiner Überlegungen unterstützt.

¹² Hasenhütl, Gerd: Zeichnerisches Wissen, in Gethmann, Daniel und Susanne Hauser (Hrsg.): Kulturtechnik Entwerfen. Praktiken, Konzepte und Medien in Architektur und Design Science. [transcript] Bielefeld, 2009, S. 342

¹³ Krauthausen, Karin: Vom Nutzen des Notierens. In: Krauthausen, K. und Omar W. Kasim (Hrsg.): Notieren – Skizzieren. Schreiben und Zeichnen als Verfahren des Entwurfs, 2010, S. 10–11

¹⁴ Lengyel, Dominik und Catherine Toulouse: 3D-Scans für die Rekontextualisierung antiker Skulptur. Electronic Media and Visual Arts (EVA), Konferenzband, Berlin, 2014, S. 138

Sowohl die Fähigkeit zur abstrakten Skizze als auch das handwerkliche Geschick des Modellbaus sind erlernbar. Beides entwickelt sich durch die Kenntnis vielfältiger architektonischer Darstellungen und verbindender Darstellungskonventionen. Darstellungsmethoden sind selbst Werkzeuge, die verschiedene Resultate erzeugen. So ließe sich mit zahllosen Beispielen belegen, wie sich analog der Entwicklung der Wissenschaft Geometrie, die Formensprache der Architektur verändert hat. Die Kulturtheoretikerin Elke Krasny bemerkt, dass »man eine Geschichte der Architektur in ganz andere Epochen einteilen [könnte], ausgehend von einer wissenschaftshistorischen Logik der Werkzeugtechnologien und der Haltung von Architektinnen und Architekten zu diesen.«¹⁵

1.4. Defizite traditioneller Werkzeuge

Während ein Teil der Entwerfer die Fähigkeit erwirbt abstrakte Darstellungen von komplexen, dreidimensionalen Objekten zu interpretieren, gelingt es einem anderen Teil, vor allem den weniger erfahrenen Nutzern und den meisten Laien nicht, bemerkt Ahmad Okeil. Die räumliche Abstraktionsfähigkeit, die nötig ist, um ein komplexes Objekt auf der Grundlage seiner zweidimensionalen Repräsentation zu erfassen, erfordert die Fähigkeit der Entschlüsselung abstrakter Informationen und muss erlernt werden. Der Entschlüsselungsprozess (auch: gedankliche Exploration) bleibt dann trotzdem eine Anstrengung, die permanent kognitive Kapazitäten bindet. Diese Kapazitäten würden somit nicht für die Schöpfung von Ideen und Konzepten zur Verfügung stehen.¹⁶

Ich möchte den Blick jedoch auf eine andere Schwierigkeit lenken: Zwar sind die Wechselwirkungen zwischen abstrakten Darstellungen und gedanklicher Rekonstruktion wichtig und richtig, weil sie genauso Denk- und Überprüfungsprozesse fördern, wie die Fähigkeit zur Konstruktion auf Grundlage zweidimensionaler Repräsentationen. Problem ist aber die mangelnde Objektivität: Die skizzierten, schematischen Perspektiven sind in frühen Phasen des Entwurfs sehr nützlich. Sie sind aber oftmals trügerisch. Zu leicht gelingt es sie – bewusst oder unbewusst – so anzupassen, dass sie dem Eindruck der gewünschten räumlichen Konfiguration entsprechen, einem Vorurteil. Um diese Beliebigkeit einzugrenzen, ist eine Präzision vonnöten, die nur geometrisch korrekt konstruierte Perspektiven bieten. Jene wiederum sind durchaus aufschlussreich, erfordern aber die Anwendung zeitaufwendiger und umständlicher geometrischer Konstruktionsverfahren.

¹⁵ Krasny, Elke et. al.: Architektur beginnt im Kopf. The making of architecture. Birkhäuser Basel, 2008, S. 11

¹⁶ Okeil, Ahmad: Hybrid Design Environments. Immersive and Non-Immersive Architectural Design, in ITcon, Vol. 15, 2010, S. 202

Zweidimensionale Perspektivdarstellungen sind in jedem Fall statisch und zeigen immer nur die vom Urheber ausgesuchten Blickwinkel, sind also bei der Vermittlung von Entwürfen unter Umständen ebenso manipulativ. Sie berücksichtigen keine Bewegung im Raum und die daraus resultierende Änderung des visuellen Eindrucks über einen gewissen Zeitraum. Gleiches gilt im Übrigen für Architekturfotografien, Renderings (auch: virtuelle Architekturfotografie) und deren Mischformen, wie Fotomontagen. Eine körperlich-zeitliche Erfahrung des Abbildungsgegenstands bleibt ausgeschlossen. Die gedankliche Exploration soll hier nicht infrage gestellt werden. Jedoch der Umfang und die Qualität ihrer Grundlage.

Charles W. Moore und Gerald Allen behaupten in *L'architecture sensible* gar, dass die traditionellen Darstellungsmethoden generell bei ihrem Versuch scheitern würden, Raum zu repräsentieren. Hinter Grundrissen und Schnitten bleibt das eigentliche Objekt verborgen, das sie abbilden sollen. Die zweidimensionale Darstellung als Medium zieht die Aufmerksamkeit auf sich, anstatt sie auf den Raum zu lenken, den sie repräsentiert.¹⁷ Diese Kritik ließe sich leicht auch auf die vielfältig gebräuchlichen Perspektivdarstellungen ausweiten, deren ästhetische Überzeugungskraft immer auch ein Selbstzweck ist. Schon Adolf Loos kritisierte:

»DIE BAUKUNST IST DURCH DEN ARCHITEKTEN ZUR GRAPHISCHEN KUNST HERABGESUNKEN. NICHT DER ERHÄLT DIE MEISTEN AUFTRÄGE, DER AM BESTEN BAUEN KANN, SONDERN DER, DESSEN ARBEITEN SICH AM PAPIER AM BESTEN AUSNEHMEN.«¹⁸

Man mag an dieser Stelle an das Architekturmodell erinnern, das durchaus veränderliche räumliche Beobachtungen zulässt. Die Skalierung beeinflusst jedoch ganz beträchtlich die visuellen Einflussgrößen. Eine Wahrnehmung der realen Proportionen des Objekts wird dadurch deutlich eingeschränkt. Ein Grund, warum seit Mitte der achtziger Jahre der Versuch unternommen wurde, mithilfe von Endoskopie räumliche Simulationen zu erzeugen.¹⁹ Ein Verfahren, das inzwischen nahezu in Vergessenheit geraten ist.

Architekturmodelle versuchen oft, ähnlich wie auch Planzeichnungen und Renderings, durch Referenzobjekte (Menschen, Fahrzeuge, Möblierungen etc.) ihre

¹⁷ Moore, Charles Willard und Gerald Allen: *L'architecture sensible*. Espace, échelle et forme. Dunod Paris, 1981

¹⁸ Loos, Adolf und A. Opel (Hrsg.): *Architektur*. Ausgewählte Schriften. Die Originaltexte. 1897–1900. Wien, 1995, S. 79

¹⁹ Vgl. auch: Martens, Bob: *Räumliche Simulationstechniken in der Architektur*. Wege zu einer neuzeitlichen Raumgestaltung. Europäische Hochschulschriften, 37. Lang Verlag, Frankfurt a. M., 1995

Maßstäblichkeit zu vermitteln. Sie verweisen auf bekannte Größen und damit auf Größenrelationen. Ein sinnvoller Ansatz, der behutsam eingesetzt seinen Zweck erfüllt, jedoch gegebenenfalls auch stark abzulenken vermag von der technisch-objektiven Beschreibung von Architektur.

1.5. Der Computer

Der Computer wird seit nunmehr vier Dekaden in der Produktion von Architektur eingesetzt. Mit dem Siegeszug von *Computer-Aided Architectural Design* (CAAD) wurde zunächst vor allem das händische Planzeichnen mit dem Tuschestift obsolet. Die Integration einer 3D-Funktionalität wurde Mitte der siebziger Jahre in bis dato zweidimensionale Programme erstmals durch den französischen Flugzeughersteller *Avions Marcel Dassault* implementiert.²⁰ Diese Technologie ermöglicht Architekten seitdem, detaillierte, gegebenenfalls hochkomplexe und dynamisch modifizierbare virtuelle Modelle zu erstellen, die im Gegensatz zum statischen Abbild traditioneller Medien eine räumliche Modellierung und Erkundung ermöglichen. Damit übernimmt der Computer die Rolle physischer Repräsentationen von Raum im Dienst der Planung, wobei er die erwähnte Freiheit der Erkundung von Entwürfen mit der Möglichkeit der permanenten Modifikation, ohne wiederholte Neuerstellung, wie eben bei manuellen Zeichnungen und Modellen, verbindet.

Mit den 1990er Jahren wurden eigentlich für die Filmproduktion entwickelte Animationssoftwares Teil des digitalen Werkzeugkastens. Sie bringen ein bis heute wachsendes Repertoire automatisierter, geometrischer Operationen mit, bis hin zur Simulation physikalischer Effekte, die zur Formfindung in der Architektur eingesetzt werden können.²¹ Mit der Parametrisierung von formgebenden Algorithmen – so eine populäre Idee der Zeit – werden Computer zu überlegenen Entwurfswerkzeugen, zu »Denkzeugen«. Die Schlagwörter sind *Generative Gestaltung* und *Computational Design*. Zum Teil heftig polarisierende Protagonisten wie Patrik S. Schumacher propagieren ein Verständnis von Entwurf und Planung in Architektur und Städtebau, das ausschließlich durch parametrische Zusammenhänge und vordefinierte Handlungsvorschriften beschreibbar ist und letztlich die subjektive Komponente »Mensch« überflüssig macht.²²

²⁰ Die Software hieß zunächst CATI (Conception Assistée Tridimensionelle Interactive) und wurde nach 1981 unter dem Namen CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) bekannt.

²¹ Schodek, Daniel L.: Digital design and manufacturing. CAD/CAM applications in architecture and design. John Wiley & Sons Hoboken, 2005, S. 50 ff.

²² Vgl.: Schumacher, Patrik: The autopoiesis of architecture. A new framework for architecture. John Wiley & Sons Hoboken, 2011

Diese Ansätze verbinden sich mit einer keineswegs neuen, durchaus zu hinterfragenden Idee der unmittelbar bevorstehenden technologischen Singularität auf Grundlage einer ungebremsten Technikeuphorie seit dem Beginn der Computereisierung.²³ Der Architekt wird zum Programmierer. Die Lösungen der Entwurfprobleme überlässt er den von ihm entwickelten Programmen. So drückt schon Joseph Weizenbaum – einer der stets kritischen Pioniere der Informatik – seine Gedanken in den siebziger Jahren aus:

»DER COMPUTER IST ALSO EIN SPIELPLATZ, AUF DEM JEDES ERDENKLICHE SPIEL MÖGLICH IST. MAN KANN WELTEN ERSCHAFFEN, IN DENEN KEINE SCHWERKRAFT EXISTIERT [...], IN DENEN DIE ZEIT IN TANZSCHRITTEN VORWÄRTS UND RÜCKWÄRTS ABLÄUFT [...]. EIN INGENIEUR IST DER MATERIELLEN WELT UNLÖSBAR VERHAFTET. SEINE KREATIVITÄT FINDET IHRE SCHRANKEN IN DEREN GESETZEN; ER KANN SCHLIESSLICH NUR DAS TUN, WAS SICH DIESEN GESETZEN ENTSPRECHEND TUN LÄSST. [...] DER PROGRAMMIERER JEDOCH IST SCHÖPFER VON UNIVERSEN, DEREN ALLEINIGER GESETZGEBER ER SELBST IST. [...] IN FORM VON COMPUTERPROGRAMMEN KÖNNEN UNIVERSEN VON MÖGLICHERWEISE UNBEGRENZTER KOMPLEXITÄT GESCHAFFEN WERDEN. AUSSERDEM, UND DAS IST DER SPRINGENDE PUNKT, HANDELN DIE SO FORMULIERTEN UND ENTWICKELTEN SYSTEME IHREN EIGENEN PROGRAMMEN GEMÄSS. SIE GEHORCHEN BEREITWILLIG IHREN GESETZEN, UND IHR FOLGSAMES VERHALTEN MACHT SICH ALLENTHALBEN BEMERKBAR.«²⁴

Die rapide wachsenden Kapazitäten von Computersystemen haben Ende der neunziger Jahre kybernetische und systemtheoretische Visionen aus den Sechzigern Wirklichkeit werden lassen. So schien der verlockende Schritt zu einer Selbsterschaffung, -organisation und -erhaltung von Systemen (auch: Autopoiesis) greifbar nah zu sein. Nicht weiterverfolgte Ansätze beispielsweise an der *Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich* zeigten die Fähigkeiten »künstlicher Intelligenz« (KI) zur Schöpfung und Optimierung urbaner Strukturen nach der Definition eines wachsenden Parameterraums. Iterativ näherten sich die Anwendungen über Tage und Wochen an »optimale« Lösungen an. Letztlich musste man aber einsehen, dass die Anzahl der Parameter, ganz gleich wie groß, immer nur einen Teil der Kriterien abbildet, die für die Schöpfung einer am Menschen orientierten Architektur einzubeziehen sind.

Inzwischen rücken dennoch viele der Themen dieser Zeit wieder ins Zentrum der Aufmerksamkeit, weil das Handling von *Big Data* und somit die Integration

²³ Als prominentester, zeitgenössischer Vertreter dieser Theorie gilt der Mathematiker Ray Kurzweil. Vgl. auch: Vinge, Vernor und Ray Kurzweil: *Technological Singularity*. Department of Mathematical Sciences, San Diego State University, 1993

²⁴ Weizenbaum, Joseph: *Die Macht der Computer und die Ohnmacht der Vernunft*. Suhrkamp Frankfurt a.M., 1977, S. 157f.

nahezu unbegrenzter Mengen von Parametern und Daten in Berechnungsprozessen möglich wird.²⁵ Sinnvoll eingesetzt werden derartige Anwendungen der KI heute beispielsweise für *crowd simulations* (Verhalten großer Menschenmengen) und immer detaillierter werdende Techniken der bauphysikalischen Gebäudesimulation. – Der Begriff der *computational creativity* aus dem Bereich der KI ist inzwischen weiter gefasst: Zwar bezieht er noch immer das fiktive Computerprogramm ein, dass es dem Menschen gleichtut und selbständig kreativ ist, aber schließt er nun auch das Verständnis und die Formulierung algorithmischer Perspektiven auf kreatives Verhalten des Menschen, und die Schaffung von Anwendungen ein, die lediglich die Kreativität des Menschen fördern ohne notwendigerweise selbst kreativ zu sein.²⁶

In der Praxis generiert der Computer heute noch keine Entwürfe selbstständig, sondern stellt dem Nutzer lediglich ein spezifisches Set an Tools bereit: Er »verbindet Stifte, Lineale, Zirkel und den Zeichentisch mit Maßstäben und Scheren, mit Paletten von Oberflächen und Mustern, mit Baumaterialien, Gestaltungselementen, Fensterfenstern und Mustertüren, sowie mit DIN-Normen [...]. [Seine Besonderheit] besteht in der Zusammenführung und umstandslosen Verfügbarkeit ehemals räumlich auseinander liegender Tätigkeiten.«²⁷ Der Nutzer kann sämtliche für Entwurf und Planung benötigten Arbeitsschritte ausführen, ohne den Raum vor dem Computerdisplay verlassen zu müssen. »[Er] wechselt zwischen Künstlerbedarfshandlung, Rechenwerkzeug, [Bücherregal,] Materiallager und Mustersammlung hin und her.«²⁸ Digitale Kommunikationsmedien und die Möglichkeit der räumlich getrennten, gemeinsamen Bearbeitung von Projekten sind integriert.

Die Wichtigkeit der letztgenannten Punkte ist nicht zu unterschätzen, denn wie Susanne Hauser schreibt, sind Entwürfe »Ergebnisse von Auseinandersetzungen zwischen vielen – mehr oder weniger wirksam – durchgesetzten Interessen. Das heißt, dass sie niemals das Ergebnis einzelner Interessen und Perspektiven sind.« Sie deutet den Versuch an, »architektonische Entwürfe als komplexe Kommu-

²⁵ Siehe auch: Mainzer, Klaus: Die Berechnung der Welt. Von der Weltformel zu Big Data. CH Beck, München, 2014

²⁶ Vgl. auch: McCormack, Jon und Mark d'Inverno: Computers and Creativity. Springer Science & Business Media Berlin, 2012

²⁷ Uhlig, Franziska: Robinsons Pflug. In: Schmitz, Thomas H. und Hannah Groninger (Hrsg.): Werkzeug – Denkzeug. Manuelle Intelligenz und Transmedialität kreativer Prozesse. [transcript] Bielefeld, 2012, S. 168

²⁸ Ebd., S. 168

nikationsprozesse zu rekonstruieren, in denen Entscheidungen über viele einzelne Aspekte getroffen und koordiniert werden.«²⁹

Das Resultat des Computereinsatzes ist die enorme Beschleunigung aller Prozesse, aber auch eine Änderung der Entwurfsmethodik: Denn während CAAD ursprünglich die Metaphern einer unmittelbaren Übertragung des manuellen Arbeitens bereitstellte, also ganz ähnlich gezeichnet wurde wie am Zeichentisch, werden nun (auch auf Grundlage von Formfindungsalgorithmen) dreidimensionale Modelle erstellt, die im Nachhinein automatisch in beschreibende zweidimensionale Zeichnungen zerlegt werden.³⁰ Die aktuellen Methoden kreieren neue Wechselwirkungen, wenn Realmodelle gescannt, digital weiterverarbeitet und im Anschluss gegebenenfalls 3D-gedruckt werden. *Rapid Prototyping* ersetzt den manuellen Modellbau und das händische Operieren mit seinen Materialien.

»BUT THE HONEYMOON FADES, AND THE DARK SIDE OF COMPUTING DESCENDS UPON YOU. THE ROMANCE WITH COMPUTERS SHOWS ITS PATHOLOGICAL ASPECTS: MINDLESS PRODUCTIVITY AND INCREASED STRESS.«³¹

1.6. Defizite computergestützter Werkzeuge

Ein Hemmnis bei der Einbeziehung von CAAD in die konzeptionelle Entwurfsphase liegt in der Gestaltung der Interfaces. Computersysteme nutzen eine grafische Organisation der Benutzeroberfläche auf der Grundlage von WIMP-Metaphern. WIMP – ein Akronym für *windows, icons, menus and pointing* – ist ein Paradigma der Mensch-Computer-Interaktion, dass Zweidimensionalität impliziert.³² Wie oben erwähnt, wird das zweidimensionale Arbeiten am Zeichentisch in eine eindeutig zweidimensionale digitale Arbeitsumgebung übertragen. Als Resultat dieser Organisation werden aber auch sämtliche Einschränkungen zweidimensionaler Medien in die computergestützten Anwendungen übernommen. Folgt man beispielsweise der oben begonnen Argumentation Ahmad Okeils, wird dem Entwerfer eine mentale Auslastung angesichts der steten Aufgabe der Dekodierung abstrakter Informationen abverlangt.³³ Die Kritik ließe

²⁹ Hauser, Susanne: Verfahren des Überschreitens. In: Ammon, Sabine und Eva Maria Froschauer (Hrsg.): *Wissenschaft Entwerfen. Vom forschenden Entwerfen zur Entwurfsforschung der Architektur*. Fink München, 2013, S. 376

³⁰ Temel, Robert: Mittel und Zweck. In: Krasny, Elke (Hrsg.): *Architektur beginnt im Kopf. The making of architecture*. Birkhäuser Basel, 2008, S. 141 f.

³¹ Heim, Michael: *Infomania*. In: *The Metaphysics of Virtual Reality*. Oxford University Press, 1993, S. 5

³² Heinecke, Andreas M.: *Mensch-Computer-Interaktion. Basiswissen für Entwickler und Gestalter*. Springer, 2012

³³ Okeil, Ahmad: Hybrid Design Environments. Immersive and Non-Immersive Architectural Design, in *ITcon*, Vol. 15, 2010, S. 204

sich auch andernorts weiterverfolgen, wo – angesichts eines sich zusehends aufblähenden Funktionsumfangs – der Nutzer zur Umsetzung seiner Überlegungen womöglich mehr Energie auf die Konfiguration des Werkzeugs und die Suche nach passenden Funktionen, als auf die Entwurfsaufgabe selbst verwendet.

Ein weiterer Nachteil von CAAD-Anwendungen im Entwurf ist die Unausweichlichkeit grafischer Präzision. Die Mehrdeutigkeit einer Skizze ist durch Computer nicht darstellbar. Die Leere des weißen Blatts, die darauf aufbauende Offenheit des Prozesses, ist bereits durch Umfang und Aufdringlichkeit des Interfaces an sich verwirkt. Mit der Vermutung, dass digitale Werkzeuge gar ein eigenes Formenrepertoire implizieren, lässt sich die Kritik fortsetzen: Orthogonalität ist in CAAD Programmen stets privilegiert. Ein rechtwinkliges Raster und die Halbierung in zwei Winkel von 45 Grad führen zu durch diese Formalien beschreibbare Architektur. Man kann von einer normativen Gestaltungskraft der Werkzeuge sprechen, die womöglich rückwirkend auch die »Erlebnismodelle« der Umwelt beeinflusst.³⁴

Der Entwerfer ist stets gezwungen, mit einem bereits bestehenden Satz von Ideen in die Anwendung zu gehen. Die geforderte Präzision zu erfüllen, stellt eine Herausforderung dar, behindert womöglich die initiierten mentalen Bilder und begrenzt dadurch das kreative Denken. Die entstehenden grafischen Repräsentationen im CAAD vermitteln dem Nutzer stets den Eindruck präziser, vollkommener und fotorealistischer Entwurfsobjekte. Insbesondere in einer frühen Entwurfsphase wird dies nicht zur Weiterentwicklung und Generierung neuer Ideen ermutigen. Ganz im Gegenteil kann der sich einstellende Eindruck des Fertigen – eine Erfahrung, von der viele Architekten zu berichten wissen – zu einem verfrühten Abbruch des Entwurfsprozesses führen.

In der Praxis benutzen Architekten aus diesen Gründen wohl auch weiterhin, insbesondere in der wichtigsten, der Konzeptphase des Entwurfs traditionelle Methoden. Häufig werden gewonnene Informationen daraufhin in Computeranwendungen eingegeben, um sie weiterzuentwickeln, zu präzisieren und schließlich zu kommunizieren. Der Schritt der Eingabe bedeutet einen zeitlichen Aufwand. Hinzu kommt, dass trotz der zunehmenden Bedeutung des 3D-Modelings im Bereich CAAD die Mehrzahl der Anwendungen noch immer einen zusätzlichen Aufwand vom Nutzer bei der Erstellung dreidimensionaler Objekt-Repräsentationen fordern. Beide Schritte können gerade den ungeübten Anwender frustrieren und den Gebrauch dreidimensionaler virtueller Modelle bei der Formfindung und der räumlichen Erkundung von Entwürfen hemmen.

³⁴ Flusser, Vilém: Vom Unterworfenen zum Entwerfer von Gewohntem, in *Intelligent Building*, Universität Karlsruhe, 1989

Schade ist, dass das Ziel der Einbeziehung dreidimensionaler, visueller Ausgabe- und räumlicher Eingabemedien in den computergestützten Entwurf in der Debatte schon fast zum Allgemeinplatz verkommen ist. Es wird mich nicht hindern, im Folgenden dafür zu argumentieren.

Das dem architektonischen Entwurfsprozesses innewohnende Ziel ist ein dreidimensionales, räumliches Produkt. Ganz gleich, wie intuitiv bestehende CAAD-Anwendungen gestaltet werden und wie gut eine 3D-Funktionalität integriert ist, das Ergebnis ihrer Darstellungen bleibt zweidimensional und versucht das Ausbleiben des dreidimensionalen Sehens zu kompensieren. Illusorisch ist die Vermittlung einer der Hauptqualitäten gelungener Architektur, die allgemein als »der rechte Maßstab« bezeichnet wird. Seine Einschätzung gelingt oft nur erfahrenen Entwerfern. Seine Vermittlung ist häufig ein vergeblicher Versuch. Die Umsetzung dreidimensionaler Ein- und Ausgabe birgt die Lösung, auch einer Reihe weiterer, oben und im Folgenden beschriebener Probleme, weil sie Aspekte integriert, die bisher nur unter zusätzlichem Aufwand Berücksichtigung fanden.

»OUR TASK TODAY, I WOULD ARGUE, IS TO RESIST THESE PATHWAYS OF THOUGHT, AND WHEREVER POSSIBLE TO EXPAND THE CONCEPT OF THE CONCRETE AND TO EXTEND THE PLAY OF INTUITION INTO NEW DOMAINS.«³⁵

³⁵ Kwinter, Sanford: Architectures of time. Toward a theory of the event in modernist culture. MIT Press, 2002, S. 213

2. Wahrnehmung und Körperwissen

Die Szenografin Hannah Groninger und der Architekt Thomas H. Schmitz heben für den Entwurf von Raum drei konstitutive Einflussfaktoren des kreativen Denkens hervor: »Erstens das *Körperwissen* als die Summe der multisensorischen und gefühlsmäßigen Erfahrungen [die uns einen] erlebbaren Bezug zur Realität der Materialien, des Raums, der Masse [verschaffen].« Dieses Körperwissen ist es, was »uns Gewissheit auf der Suche nach dem Neuen [gibt].« An zweiter Stelle benennen sie »die *Kommunikation* [...] die – als Sprache, Geste, Skizze oder Modell – immer des Körpereinsatzes bedarf.« Und »drittens die *Interaktion von Machen und Denken*«, wobei sie vermuten, »dass der Körper gerade bei kreativen Prozessen eine Schlüsselfunktion zur Entdeckung der (noch) unbewussten Überlegung übernehmen kann.«³⁶ – Die Akkumulation des Körperwissens und die Integration der multisensorischen Wahrnehmungen, sollen im folgenden Kapitel umrissen werden.

2.1. Sehen und Raumwahrnehmung

Das Verlangen, den physischen Raum so abzubilden, wie wir ihn wahrnehmen, ist ein altes Anliegen. Die historische Entwicklung visueller Simulation von virtueller Räumlichkeit lässt sich gut nachvollziehen, weil sie durch erhaltene Artefakte belegt ist. Die korrekte geometrische Perspektivkonstruktion schafft seit der Renaissance die Illusion räumlicher Tiefe in einer piktorialen Dimension. Insbesondere die illusionistische Quadratura-, Trompe l'Œil- und Di-sotto-in-sù-Malerei, sowie der Chiaroscuro-Malerei, die sich meisterhaft mit Licht und Schatten auseinandersetzt, werden perfektioniert. Einige, der im Folgenden erwähnten Tiefenhinweise, wie beispielsweise die der Linearperspektive, der atmosphärischen Perspektive oder des Schattenwurfs sind bereits in dieser Zeit umfassend verstanden und künstlich erzeugt worden.³⁷

Inwiefern sich Menschen früherer Zeiten in der Simulation akustischer, haptisch-taktiler, propriozeptiv-kinästhetischer oder olfaktorisch-gustatorischer Wahrnehmung übten, ist dagegen ungleich schwerer nachzuvollziehen. Auch wenn der Sehsinn die räumliche Wahrnehmung dominiert, wirken doch alle Sinnesindrücke auf die Wahrnehmung von Architektur ein. In der Technologiedebatte über *Virtual Reality*, aber womöglich auch in der Architekturtheorie, nimmt die multimodale Natur unserer Sinneswahrnehmung von Raum sicher noch eine zu kleine Rolle ein.

³⁶ Schmitz, Thomas H. und Hannah Groninger (Hrsg.): *Werkzeug – Denkzeug. Manuelle Intelligenz und Transmedialität kreativer Prozesse.* [transcript] Bielefeld, 2012, S. 23–24

³⁷ Vgl. auch: Belting, Hans. *Florenz und Bagdad. Eine westöstliche Geschichte des Blicks.* CH Beck, München, 2008. Oder: Edgerton, Samuel Y.: *Giotto und die Erfindung der dritten Dimension. Malerei und Geometrie am Vorabend der wissenschaftlichen Revolution.* Fink, München, 2004.

»A brief history of Virtual Reality«

Natürlich ließe sich die Geschichte VR auch so erzählen: angefangen etwa bei den ersten zeichnerischen Darstellungen der Menschheit bis hin zu den stereoskopischen Bildbetrachtern der viktorianischen Epoche. Manch einer verweist gelegentlich auf alle Arten von »out-of-body-experiences«. Konzentriert man sich aber auf das Computerzeitalter sind es eine Reihe von Pionieren und Phantasien, die maßgebliche Beiträge zur technischen und begrifflichen Entwicklung der VR leisteten:

1946 bis 1953 – die Hochphase der Kybernetik – legten auf den in den USA stattfindenden »Macy-Konferenzen« bedeutende Wissenschaftler wie **Alan Turing**, **John von Neumann** und **Heinz von Foerster** die Grundsteine der modernen Computertechnik, die heute die Voraussetzung bildet für Cyberspace und VR.

1962 ließ sich der amerikanische Filmmacher **Mart Heilig** nach jahrelanger Arbeit sein »Sensorama« patentieren. Es handelte sich um eine Art Spielautomat mit einem 3D-Display, vibrierendem Sitz und sogar der Erzeugung von Gerüchen. Heilig stellte sich seine Erfindung als das »Kino der Zukunft« vor.

1964 erschien der Roman des Polen **Stanislaw Lem** »Summa technologiae«. In der deutschen Übersetzung von 1974 findet sich der Begriff »Periphere Phantomatik«, der oft als erstes Synonym für den Begriff Cyberspace bezeichnet wird.

1965 konzipierte **Ivan Sutherland** – auch als Schöpfer des ersten computergestützten Zeichenprogramms »Sketchpad« bekannt – sein »ultimatives Display« am »Massachusetts Institute of Technology«. Das unerreichte Ideal war für ihn der Raum in dem der Computer die Existenz von Materie kontrollieren kann.

1968 präsentierte Sutherland eine sehr vorläufige Variante eines solchen Geräts, dass er selbst »Damoklesschwert« nannte. Es ist das erste »Head Mounted Display« der Geschichte. Zur selben Zeit entwickelte **Thomas Furness** in der »Wright-Patterson Airforce Base« in Ohio einen neuen Typus von Flugsimulatoren, der eine Jahrzehnte andauernde Weiterentwicklung nach sich zog und als »Super Cockpit« bekannt ist. Ein anderer Protagonist der späten Sechziger ist der amerikanische Medienkünstler **Myron Krueger**. Krueger umriss eine neue Art der Erfahrung, die er als »artificial reality« bezeichnete und die das Ziel einer vollkommenen neuen Interaktion von Mensch und Computer verfolgte.

1982 verwendete der Australier **Damien Broderick** den Begriff »Virtual Reality« vermutlich erstmalig in seinem Sciencefiction-Roman »The Judas Mandala«.

1984 wurde »VPL Research« im kalifornischen Palo Alto von **Jaron Lanier** gegründet. Lanier, der später auch als Technikphilosoph und Musiker Karriere machte, versuchte mit seinem Unternehmen die Weiterentwicklung und Vermarktung des während seiner Zeit bei »Atari« entstandenen »Data Glove«, ein Datenhandschuh, der das Greifen nach virtuell abgebildeten Gegenständen möglich machen sollte. Im selben Jahr legte der Amerikaner **William Gibson** seine SciFi-Triologie »Neuromancer« vor. Sie ist die Vorlage vieler filmsicherer Adaptionen der späten Neunzigerjahre, etwa der »Matrix«-Triologie. Gibson gilt, unter Berufung auf Lem, als der Erfinder der so unscharfen wie attraktiven Begriffe Cyberspace, Cybernaut oder Cyberwar. VR war für ihn so etwas, wie eine »consensual hallucination«.

In den Neunzigern entwickelten sich vielerorts technologische Ansätze zur Implementierung von VR. Vor allem digitale Projektionsräume verbreiteten sich zusehends als »CAVEs«. Sie finden bis heute Anwendung in der Industrie, im Design und in der Unterhaltungsindustrie.

2012 begannen **Palmer Luckey** und **John Carmack** in Kalifornien mit der Entwicklung der »Oculus Rift«. Und obgleich in den Schubladen vieler Unternehmen ähnliche Produkte schlummerten, schaffte es kein anderes einen derartigen, neuen Hype der VR auszulösen.

Wer sich mit VR und ihrer Bedeutung für die Architektur beschäftigt ist gut beraten, sich die physiologischen Rahmenbedingung vor Augen zu führen. Sie sind zugleich Grundlage und Herausforderung für die Implementierung. Das offensichtlichste Phänomen für die Funktionsweise des Sehsinns (auch der visuellen Interfaces der VR) ist die *Stereopsis*, das Stereosehen (auch: stereoskopisches Sehen). Obwohl der Mensch die Welt mit zwei Augen sieht, nimmt er nicht zwei separate Bilder wahr. Stattdessen ermöglicht der minimale Unterschied zwischen den beiden zweidimensionalen Netzhautreizungen die Rekonstruktion einer dreidimensionalen Umwelt.

Das Stereosehen ist aber bei weitem nicht der einzige Hinweis, den das Gehirn zur Rekonstruktion einer räumlichen Tiefe nutzt. Besonders nachvollziehbar wird dies angesichts von Schätzungen, dass etwa jeder fünfte Mensch stereoblind, binokulares Sehen für ihn also nur eingeschränkt oder überhaupt nicht relevant ist. Den meisten der von Stereoblindheit betroffenen Menschen ist dieser Zustand – ganz ähnlich wie bei Farbenblindheit – nicht einmal bewusst. Es müssen also eine ganze Reihe weiterer sogenannter Tiefenhinweise wahrgenommen werden, die als ein aktueller Kenntnisstand aus vorwiegend technologisch orientierter Literatur in der folgenden Liste zusammengetragen wurden.³⁸

Tiefenhinweis	Wirkungsbereich	Klassifizierung	Positionsbestimmung
Disparität	bis 10 m	binokular	relativ
Konvergenz	bis 2 m	binokular	absolut
Akkommodation	bis 2 m	monokular	absolut
Tiefenschärfe	komplett	monokular	relativ
Verdeckung	komplett	monokular	relativ
Linearperspektive	komplett	monokular	absolut
Texturgradient	komplett	monokular	relativ
Relative Größe	komplett	monokular	absolut
Bekannte Größe	komplett	monokular	absolut
Höhe im Gesichtsfeld	über 30 m	monokular	relativ
Atmosphärische Perspektive	über 30 m	monokular	relativ
Beleuchtungsrichtung	komplett	monokular	relativ
Schattenwurf	komplett	monokular	relativ
Bewegungsparallaxe	über 20 m	dynamisch	relativ
Akkretion	komplett	dynamisch	relativ

Ein Beispiel für Tiefenhinweise, die unabhängig vom Stereosehen sind, ist unser erlerntes Verständnis von Größen und Größenrelationen. Wie oben bereits erwähnt, bedient sich die Architektur häufig optischer Referenzen, um Maßstäbe zu vermitteln. Weil wir seit frühester Kindheit ein Verständnis von der Größe

³⁸ Vgl. auch: Dörner, Ralf und Frank Steinicke: Wahrnehmungsaspekte von VR. In: Virtual und Augmented Reality, Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität, Springer Berlin/Heidelberg, 2013, S. 41

einer erwachsenen Person haben, funktioniert diese Referenz in Darstellungen lebenslänglich. Dies ist nur ein Indiz für die Bedeutung unserer Erfahrungen bei der Interpretation räumlicher Wahrnehmung.

2.3. Bewegungswahrnehmung

Beispiele monokular funktionierender Tiefenhinweise sind Verdeckungen, die auch zu den durch Bewegung entstehenden dynamischen Veränderungen des Bildes zählen. Es gibt weitere veränderliche Eindrücke, so ziehen etwa Objekte in der Nähe schneller an uns vorbei, als Objekte in der Ferne, und auch die Ausleuchtung und der Schattenwurf verändern sich, wenn Objekte sich selbst bewegen.³⁹

Ein wichtiger Aspekt der visuellen Bewegungswahrnehmung – auch für die Erzeugung virtueller Umgebungen – ist der *optical flow* und der untergeordnete Effekt der *Vektion*, der beispielsweise dann entsteht, wenn sich Objekte in einem eingeschränkten Sichtfeld bewegen und das Gefühl hervorrufen, man bewege sich selbst. Ein Beispiel für diesen Effekt ist der Moment, in dem ein Zug am Nachbargleis anfährt. Vom stehenden Zug aus gesehen macht er dem Betrachter leicht glauben, der eigene Zug würde sich bewegen. So nehmen wir die Bewegung anderer Verkehrsteilnehmer im Straßenverkehr aus den Augenwinkeln wahr und berücksichtigen sie zumeist »unbewusst« bei der eigenen Fortbewegung. Objekte mit divergentem »Fluss« werden dabei als näherkommend wahrgenommen.

Der *optische Fluss* wurde als Begriff von James Jerome Gibson eingeführt. Mit zwei bis heute nachhallenden Ansätzen revolutionierte er den Blick der Psychologie auf die Wahrnehmung: Der erste Ansatz, den er mit seiner Erforschung visueller Felder untermauerte, umreißt den Rahmen, in dem die Bewegung zur Bedingung der visuellen Stimulation wird. Hiernach formulierte er die Idee eines konzeptionellen dreidimensionalen Raumes. Für Gibson ist die Raumwahrnehmung eine Integration von der visuellen Wahrnehmung der Umgebung *und* der Interaktion mit ihr. Indem Gibson die Aktivität an sich ins Zentrum rückt, setzt er ein Subjekt voraus, das in spezifischer Weise, intentional mit seiner Umwelt umgeht.⁴⁰ Diese Sichtweise hatte bereits Jakob von Uexküll im frühen 20. Jahrhundert vorweggenommen, in seinen Studien über Unter-

³⁹ Dörner, Ralf und Frank Steinicke: Wahrnehmungsaspekte von VR. In: Virtual und Augmented Reality, Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität, Springer Berlin/Heidelberg, 2013, S. 41

⁴⁰ Gibson, James J.: The perception of the visual world, Houghton Mifflin Boston, 1950

schiede zwischen *Merkwelt* und der *Umwelt* der Tiere.⁴¹ Unsere Umwelt enthält Ultraschallwellen, unsere Merkwelt nimmt diese nicht wahr. Die Merkwelt der Fledermäuse hingegen schon. Bezogen auf die menschliche Psychologie und vor allem in Hinblick auf die VR bedeutet dies auch, dass nicht alles, was wir wahrnehmen, relevant ist. Es gilt zu unterscheiden, welche Angebote der Umwelt (auch: *Affordanzen*) für spezifische VR Anwendungen berücksichtigt werden und welche eher nicht.

Gibson geht davon aus, dass der Mensch visuelle Wahrnehmung gelernt haben muss, um überhaupt sehen zu können, was er sehen will. Affordanzen bedeuten aber auch, auf Grundlage von Wissen die Möglichkeit zum Handeln zu erkennen. – »Sehen lernen!« ist vielleicht die beliebteste Unterrichtung von Zeichenlehrern im Kunst- und Architekturstudium. Le Corbusier hat seine Empfehlung zur Synthese von Sehen und Denken so formuliert:

»MAN MUSS IMMER SAGEN, WAS MAN SIEHT, VOR ALLEM MUSS MAN IMMER – UND DAS IST WEITAUSSCHWIERIGER – SEHEN, WAS MAN SIEHT.«⁴²

2.4. Propriozeption und Kinästhesie

Die Bewegungswahrnehmung wäre nur unvollständig beleuchtet, würde die Rolle der Körperempfindungen dabei außer Acht gelassen. Die Propriozeption beschreibt die Empfindung der Körperbewegung, Körperlage und die Stellung einzelner Körperteile zueinander.⁴³ Einen wesentlichen Anteil – auch für die Synthese visueller Wahrnehmung – hat die Stellung des Kopfes im Verhältnis zum Rumpf auf Grundlage propriozeptiver Afferenzen der Halsmuskulatur. Durch eine permanente Veränderung der Kopfposition wird außerdem ein veränderlicher visueller Eindruck der Umgebung erzeugt, der zu einer ständigen Rückversicherung der kognitiven Rekonstruktion der Umgebung dient.

Die Kinästhesie als Teilbereich der Propriozeption bezeichnet den reinen Bewegungssinn. Hierfür werden die Rezeptoren des Bewegungsapparates (Gelenke, Muskeln, Sehnen) herangezogen.⁴⁴

⁴¹ Vgl. auch: Agamben, Giorgio und Davide Giuriato (Übers.): Das Offene. Der Mensch und das Tier. Suhrkamp Frankfurt am Main, 2003

⁴² Le Corbusier: An die Studenten. Charte d'Athenes. Rowohlt Hamburg, 1962

⁴³ Buser, Kurt: Kurzlehrbuch Medizinische Psychologie/Medizinische Soziologie, Urban&Fischer München/Jena, 62007, S. 93

⁴⁴ Proske, Uwe und Simon C. Gandevia: The kinaesthetic senses. The Journal of physiology, 587.17, 2009, S. 4139–4146

2.5. Haptik und Oberflächensensibilität

Haptik kann auch als »handgreiflich-körperliche Zugang des Menschen zur Welt und zu sich selbst«⁴⁵ umschrieben werden. Das Tastsinnessystem ersetzt bei geburtsblinden Menschen das visuelle Sehen auf erstaunliche Weise. Bei ausreichender sozialer Einbindung und Stimulation entsteht ein adäquates »Abbild« der physischen Welt. Dies ist aber nur ein Hinweis auf den enormen Leistungsbereich des Tastsinnessystems. Er verweist auf einen noch viel bedeutenderen Aspekt: auf die direkte Beteiligung des Tastsinns an Bewusstseinsprozessen.⁴⁶

Die zunehmende Rückeroberung des Tastsinns in der digitalisierten Welt zeigt sich in Tendenzen moderner Interfacegestaltung. Immer häufiger wird die Steuerung von Objekten auf Bildschirmen von Computern und Mobilgeräten mit Hand und Fingern vorgenommen. Herbert Marshall McLuhan führte den Begriff der *digitalen Taktilität* ein.⁴⁷ Die Künstlerin Elke Mark zitiert Till Heilmann, der vom »[...] unmöglichen Wunsch des Menschen, über die Vermittlung von Tasten und Schaltflächen, über die Ebene der schriftlichen und der grafisch-ikonografischen Vermittlung hinaus die digitalen Dinge selbst in den Griff zu bekommen« versucht.⁴⁸ Inzwischen wäre der Mensch mit seinen Körperbewegungen jedoch Teil des Interfaces. »In Kombination mit dem Sehen kommt dem Tastsinnesvermögen der Hand in der Auge-Hand-Koordination eine besondere Stellung zu. Sie bildet in Verbindung mit der visuellen Wahrnehmung, Schreiben und Lesen wichtige Grundlagen für unsere Bewusstseinsprozesse heraus.«⁴⁹

2.6. Hören

Im Gegensatz zum visuellen Sinn ist die räumliche Auflösung beim Hören sehr viel geringer. Allerdings werden auch hier eine Reihe von Faktoren einbezogen, wie beispielsweise die komplexen Filterwirkungen von Kopf, Außenohr und Rumpf. Die Rekonstruktion räumlichen Hörens erfolgt durch Auswertung von sich zwischen den Ohren unterscheidenden Amplituden und Laufzeitdifferenzen des sich radial-wellenförmig ausbreitenden Schalls. Die Unterscheidbarkeit von Intensität und Frequenz hat jedoch Grenzen: zwei verschiedene Geräuschquellen müssen zur Differenzierung schon mehrere Grad auseinander-

⁴⁵ Grunwald, Martin: Haptik, in Schmitz, Thomas H. und Hannah Groninger (Hrsg.): Werkzeug – Denkzeug. Manuelle Intelligenz und Transmedialität kreativer Prozesse. [transcript] Bielefeld, 2012, S. 168

⁴⁶ Ebd., S. 168f.

⁴⁷ McLuhan, Marshall: The Medium is the Massage: An Inventory of Effects, Random House, 1967

⁴⁸ Mark, Elke: Taktile Wissen. In: Schmitz, Thomas H. und Hannah Groninger (Hrsg.): Werkzeug – Denkzeug. Manuelle Intelligenz und Transmedialität kreativer Prozesse. [transcript] Bielefeld, 2012, S. 136. Zitiert: Heilmann, Till A.: Digitalität als Taktilität, Zeitschrift für Medienwissenschaft 3, Berlin 2010

⁴⁹ Ebd., S. 136

liegen. Besser funktioniert die zeitliche Auflösung: Zwei bis drei Millisekunden zeitlicher Diskrepanz eintreffender Signale werden hierbei unterschieden.⁵⁰

Seit einiger Zeit rückt die Bedeutung des Hörens immer stärker in den Fokus der Raumwahrnehmung und somit auch der Architektur. Natürlich war das Hören schon immer Thema der Akustik, denkt man beispielsweise an den Entwurf von Konzertsälen. Eine auditive Architekturtheorie aber existiert bisher nicht. Auditive Architektur ist zudem eine neue künstlerisch-wissenschaftliche Disziplin, wie Alex Arteaga berichtet.⁵¹

Neuere Forschungen beschäftigen sich mit dem Hören auch im Zusammenhang vom Verständnis der Materialeigenschaften. So werden für die Rekonstruktion der Umwelt ganz unbewusst ständig akustische Eigenschaften von Oberflächen und Körpern herangezogen. Konzentriert man sich beispielsweise einmal alleine auf das Geräusch, das die eigenen Schritte auf dem Boden machen, so wird klar, dass dadurch erst die Beschaffenheit des Bodens verständlich wird. Der visuelle Eindruck ist völlig untergeordnet, und – vorausgesetzt man läuft nicht barfuß, trägt bequeme Schuhe – ist auch das Tastsinnesystem damit nur peripher beschäftigt.

2.7. Verbale Kommunikation und manuelle Gesten

Eine Rekonstruktion der Umwelt wird natürlich erst »durch Sprache, durch ihre Fähigkeit, Wirklichkeit zu stiften, sie erfahrbar zu machen«⁵² möglich. – Mit welchen Schwierigkeiten der Gebrauch der Sprache jedoch verbunden ist, lässt sich leicht an dieser Arbeit überprüfen. – Interessant für den Entwurf von Architektur erscheint die multimodale Kommunikation bei der Externalisierung gedanklicher, räumlicher Zusammenhänge. Einbezogen werden deswegen die manuellen Gesten, die verbale Kommunikation oft begleiten und deren Bedeutung nicht zu unterschätzen ist.

Eine Reihe von Publikationen aus den Bereichen Semiotik, Verhaltensforschung, Tanz- und Choreographie-Forschung sowie Psychologie und Psycholinguistik beschäftigen sich mit den Gesten bei der Vermittlung von abstrakten oder/und

⁵⁰ Dörner, Ralf und Frank Steinicke: Wahrnehmungsaspekte von VR. In: Virtual und Augmented Reality, Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität, Springer Berlin/Heidelberg, 2013, S. 43

⁵¹ Arteaga, Alex: Auditive Architektur Einführung in eine neue Disziplin. Kunsttexte, 4/2010

⁵² Tellkamp, Uwe: Laudatio auf Mircea Cărtărescu, Leipziger Buchpreis, 15.03.2015

räumlichen Zusammenhängen.⁵³ Es liegt auf der Hand, dass hier häufig Architektur als Gegenstand der Auseinandersetzung genutzt wird. Eine Vielzahl von Studien suchen nach einem verbindenden Repertoire gestischer Metaphern, die von Menschen zur Erklärung räumlicher Zusammenhänge genutzt werden. Die Erkenntnisse, so bruchstückhaft sie bisher auch sein mögen, drängen die Idee auf, man könne Gesten für Interfaces der Mensch-Computer-Interaktion nutzbar machen. Die semiotisch orientierte Gestenforscherin Irene Mittelberg beispielsweise definiert gestische Zeichen als multimodale Repräsentationsformen. Man könne Gesten als ein »Vorwürfsentwurf« verstehen, der verinnerlichte, konzeptionelle Bilder und Strukturen wie Bildschemata und metaphorische Konzepte in Figuren sichtbar macht, und ihnen – so gibt sie den Ausblick – für das architektonische Gestalten das Potenzial eines Werkzeugs zuschreiben.⁵⁴

Mit den manuellen Gesten als Interaktion von Machen und Denken ist hier der Anschluss zu den im ersten Kapitel benannten Entwurfsmethoden hergestellt. Im folgenden Kapitel wird versucht, der Technologie VR ihren Platz einzuräumen. In der Übersetzung von Gesten liegt möglicherweise ein großes Potenzial, das hier nicht weiter untersucht werden konnte, aber den Ausblick gibt auf zukünftige Arbeiten. Zuvor noch ein kurzer Blick auf Korrektive des Sehens.

2.8. Korrektive des Sehens

Die Korrektur der geometrischen Ordnung ist eine beachtliche Fähigkeit des menschlichen Sehens. Denn »[obwohl] die Netzhaut gekrümmt ist, ist das Auge in der Lage, gerade Kanten im Allgemeinen, senkrechte Kanten im Speziellen als solche zu erkennen. Die perspektivische Projektion auf eine ebene Fläche, sei es auf Papier oder in einer Fotokamera, ist grundsätzlich anders als die Projektion im sphärischen Auge – bis auf die praktisch unbedeutende Ausnahmesituation, wenn der Betrachter einer planen Perspektive exakt den Hauptpunkt fixiert.«⁵⁵

Der Mensch scheint interessanterweise immer von der Orthogonalität seiner Umwelt auszugehen. Für die Architekturdarstellung resultiert daraus ein Problem. Würde sie diesen Effekt nicht kompensieren, führte dies zur Verfälschung

⁵³ Etwa: Goldin-Meadow, S. und Wagner, S.M.: How our hands help us learn. *Trends in Cognitive Sciences* 9, 2005, S. 234–241. Oder: Heath, C. und Luff, P.: Gesture and institutional interaction. *Figuring bids in auctions of fine art and antiques*, *Gesture*, 7(2), 2007, S. 215–240. Oder auch: Visser, W.: *The cognitive artifacts of designing*. Erlbaum Mahwah, 2006.

⁵⁴ Mittelberg, Irene: *Ars memorativa*, Architektur und Grammatik. In Schmitz, Thomas H. und Hannah Groninger (Hrsg.): *Werkzeug – Denkzeug. Manuelle Intelligenz und Transmedialität kreativer Prozesse*. [transcript] Bielefeld, 2012, S. 191 f.

⁵⁵ Lengyel, Dominik und Catherine Toulouse: 3D-Scans für die Rekontextualisierung antiker Skulptur. *Electronic Media and Visual Arts (EVA)*, Konferenzband, Berlin, 2014, S. 138

des Charakters der dargestellten Architektur. Eigentlich senkrechte Wände und ganze Gebäude erschienen durch *stürzende Linien* geneigt. »Die traditionelle architektonische Perspektivzeichnung verwendet daher in der Konstruktion der Perspektive eine senkrechte Bildebene, ebenso wie die traditionelle Architektur- fotografie auf eine senkrechte Bildebene notfalls mit Hilfe von Spezialobjektiven mit verschiebbarer Trägerplatte belichtet [auch: *Shiff*].«⁵⁶

Ein weiteres Korrektiv ist die *Robustheit der linearen Perspektive*.⁵⁷ Ein Phänomen, das dafür sorgt, dass Verzerrungen vom Betrachter ignoriert werden, obwohl er die Perspektive nicht von dem Punkt aus sieht, von dem sie aufgenommen beziehungsweise konstruiert wurde. Beobachten lässt sich dieser Effekt etwa im Kino: Denn auch wenn der Besucher in der ersten Reihe rechts außen wahrscheinlich eine ganz andere Perspektive hat, als die Kamera, mit der aufgenommen wurde, so sieht er den Film doch richtig. Offenbar entzerrt das visuelle System des Betrachters den falschen Bildeindruck. Diese Korrektur basiert – so die Vermutung – auf der Abweichung der Blickrichtung von der Normalen der Bildebene.⁵⁸

–

Versuchte man alle bisher beschriebenen Sinneseindrücke zusammenzuzählen und sie in der benötigten zeitlichen Auflösung durch einen Computer für die Simulation einer virtuellen Welt berechnen zu lassen, würde dies einen schwer zu zählenden Datenstrom generieren. Jedoch ist dies vielleicht gar nicht erforderlich. Der Mensch ist in der Lage, selbst aus einer reduzierten Anzahl, selbst verzerrter Wahrnehmungen, eine Vorstellung von Welt zu synthetisieren, die umfassend ist und ihn einschließen kann. Die beiden letztgenannten Punkte dieses Kapitels können auch als Belege dieser Fähigkeit verstanden werden. Viele Beobachtungen und Erkenntnisse zeigen, dass einzelne Sinneseindrücke andere Aspekte suggerieren. In der offensiven Suggestion liegt womöglich ein Schlüssel für die Weiterentwicklung der Technologie Virtual Reality.

»THE WORLD, AS WE PERCEIVE IT, IS OUR OWN INVENTION.«⁵⁹

⁵⁶ Ebd., S. 138

⁵⁷ Vgl. auch: Kubovy, Michael: The psychology of perspective and Renaissance art. CUP Archive, 1988

⁵⁸ Vishwanath, Dhanraj, Ahna R. Girshick und Martin S. Banks: Why pictures look right when viewed from the wrong place. Nature neuroscience 8,10, 2005, S. 1401–1410

⁵⁹ von Foerster, Heinz: The Invented Reality. In: Watzlawick, Paul (Hrsg.): The Invented Reality. How do we know what we believe we know? Contributions to constructivism, Norton, 1988, S. 45–46

3. Virtual Reality

Virtual Reality wird in dieser Arbeit als stehender Begriff genutzt. Es wäre zweifellos an der Zeit, diese inkonsistente Bezeichnung für die Fortführung der interdisziplinären Debatte auszutauschen, da das Wortpaar ein offensichtliches Paradox einschließt, ganz abgesehen davon, dass der Realitätsbegriff in der Philosophie von je her schwer umkämpft ist. Diese Arbeit versucht sich nicht daran, einen Beitrag zum philosophischen Diskurs zu leisten. Der amerikanische Autor Michael R. Heim – einer der bekannteren Akteure der populärwissenschaftlichen Auseinandersetzung über VR in den neunziger Jahren, kürzt die Frage nach dem Realitätsgriff wie folgt ab:

»IF FOR TWO THOUSAND YEARS WESTERN CULTURE HAS PUZZLED OVER THE MEANING OF REALITY, WE CANNOT EXPECT OURSELVES IN TWO MINUTES, OR EVEN TWO DECADES, TO ARRIVE AT THE MEANING OF VIRTUAL REALITY.«⁶⁰

Pragmatisch betrachtet handelt es sich – zumindest aktuell – um eine Technologie, genauer: eine *Mensch-Maschine-Schnittstelle*, deren wesentliches Potenzial in der Möglichkeit liegt, dem Nutzer die Illusion der Anwesenheit in einer virtuellen Umgebung zu suggerieren. VR kann also als technologisches System beschrieben werden, dass in erster Linie das Gefühl der Präsenz in einer dreidimensionalen computergenerierten Welt vermittelt. Die Empfindung dieser Präsenz ist das Ergebnis des Funktionsumfangs der VR, der die Interaktion mit der virtuellen Umgebung in Echtzeit voraussetzt.

Andere – weniger verfängliche – Bezeichnungen für das Produkt dieser Technologie sind *Virtuelle Umgebung* (*Virtual Environment*, kurz: *VE*) und *Immersive Virtuelle Umgebung* (*Immersive Virtual Environment*, kurz: *IVE*).

Der besondere Nutzen für die Architektur ist dabei die Erkundung von Räumen und Orten im Abbildungsmaß 1:1, was bedeutet, dass die tatsächliche Größe abgebildeter Objekte und die optische Größe ihrer Abbildungen gleich groß sind. Die dafür notwendige Technologie erzeugt die visuelle Wahrnehmung eines gleich großen Objekts, indem sie möglichst viele der bekannten Tiefenhinweise (→ *Stereosehen und Tiefenhinweise*) der kognitiven Rekonstruktion der Umwelt zur Verfügung stellt. Die Wahrnehmung visueller Hinweise kann mit einer sehr realistischen raumakustischen Simulation verbunden werden. Die Berechnung von Resorptions- und Absorptionsprozessen von Schall ist – genauso wie jene des Lichts – heute umfänglich möglich und im Prinzip nur eine Frage verfügbarer Rechenleistungen.

⁶⁰ Heim, Michael: *The Essence of VR*. In: *The metaphysics of virtual reality*. Oxford University Press, 1993, S. 117

3.2. Wahrnehmungsaspekte

Visuelle und akustische, räumliche Wahrnehmungsaspekte werden relativ problemlos durch die hierfür zur Verfügung stehenden Software-Engines simuliert und können bedarfsweise in verschieden starker Ausprägung in virtuelle Umgebungen integriert werden. Die erforderlichen Datenmengen werden bereits durch hochwertige, aber handelsübliche Computersysteme in Echtzeit generiert. Als Interfaces der Ausgabe werden beispielsweise *Head-Mounted-Displays* (HMD) und Raumklang-Kopfhörer genutzt. Integrierte Gyrosensorik und Infrarotkameras erfassen Bewegung und Gesten. Und auch wenn die Palette der Umweltreize nur in Teilen abgedeckt ist, so ist das Resultat doch schon jetzt sehr überzeugend.

Die Laufzeit-Umgebung *Unity* (*Unity Technologies*) beispielsweise, die problemlos mit auch in der Architektur gebräuchlichen Modeling- und Visualisierungsprogrammen wie etwa *Cinema 4D* (*Maxon*) zusammenarbeitet, integriert bereits jetzt die stereoskopische Ausgabe für etwa das HMD *Oculus Rift* (*Oculus VR*). Nutzer von *Cinema* kennen den mächtigen Funktionsumfang dieser Software, der auch physikalische Simulationen und Raumakustik beinhaltet. *Unity* kann als ihr verlängerter Arm verstanden werden, der alle in *Cinema* vorgefertigten Objekte, Umgebungen und Animationen für die Exploration in Echtzeit bereitstellt. Natürlich sind die Simulationen in *Cinema* und *Unity* Interpolationen auf Grundlage weniger komplexer physikalische Modelle. Die Weiterentwicklung dieser Modelle vollzieht sich aber derartig schnell, dass eine umfassende Beschreibung mit Aktualitätsanspruch vom Vornherein zum Scheitern verurteilt wäre.

Die Bildsynthese geschieht in den Laufzeit-Umgebungen auf Basis von mehr oder weniger komplexen *Render-Engines*. Sie berechnen die Sichtbarkeit von Objekten, das Aussehen der Oberflächen (auch: *Shading*) und die Lichtverteilung innerhalb einer Szene, was Schattenwurf und indirekte Beleuchtung einschließt. Aufwendige Berechnungsmodelle wie *Raytracing* oder *Radiosity* vollständig und in Echtzeit und in der gewünschten Auflösung bei der Ausgabe von VR-Renderern zu nutzen, liegt derzeit noch in weiter Ferne. Auch hier bleibt also abzuwarten, was die technologische Weiterentwicklung mit sich bringt.

Ein komplexeres System der rechenintensiven Simulation von Schallausbreitung im dreidimensionalen Raum ist etwa das System *RAVEN* der *Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen*. Zur Beschleunigung des Verfahrens wurden die für das Richtungshören relevanten frühen Schallreflexionen abgekoppelt von

den späteren, die als Nachhall wahrgenommen werden. Die letzteren werden mit einem stochastischen Verfahren ermittelt.⁶¹

3.1.2. Immersion und Präsenz

Das Ziel der meisten Anwendungen der VR ist *Immersion*: das möglichst umfassende Eintauchen in die virtuelle Umgebung. Michael R. Heim schreibt hierzu:

»THE VIRTUAL ENVIRONMENT SUBMERGES THE USER IN THE SIGHTS AND SOUNDS AND TACTILITY SPECIFIC TO THAT ENVIRONMENT. IMMERSION CREATES THE SENSE OF BEING PRESENT IN A VIRTUAL WORLD, A SENSE THAT GOES BEYOND PHYSICAL INPUT AND OUTPUT. HOW PRESENCE AND IMMERSION COALESCE REMAINS AN OPEN QUESTION IN VR RESEARCH.«⁶²

Im Nachsatz gibt er den Ausblick auf eine Untersuchung unter Einbeziehung des zweiten fundamentalen Begriffs der *Präsenz*. Im technologischen Zusammenhang ist damit das Gefühl gemeint, durch das der Betrachter auf die virtuelle Umgebung so reagiert, als ob es sich um eine reale Umgebung handeln würde. Dabei werden die drei Faktoren *Ortsillusion*, *Plausibilitätsillusion* und *Involviertheit* begrifflich unterschieden.⁶³

Die Ortsillusion bezieht sich auf das Gefühl, sich am virtuellen Ort zu befinden. Sie wird vor allem durch die qualitative Reife der verwendeten Interfaces erzeugt. Ein großer Teil der oben beschriebenen Wahrnehmungsaspekte, vor allem visuelle und akustische, kann heute technisch simuliert werden. Die verwendeten Interfaces werden zusehends brillanter. Wachsende Rechenkapazitäten stellen die Informationen in benötigter Menge und Geschwindigkeit zur Verfügung. Sobald die betrachterabhängige Darstellung erreicht ist, das heißt, dass das Interface auf den Betrachter dahingehend reagiert, dass er die von seiner Körperposition abhängigen Informationen bekommt, fühlt er in der virtuellen Umgebung präsent.

Die Plausibilitätsillusion erzeugt das Vertrauen, dass die umgebenden Ereignisse wirklich passieren können. Je stärker zum Beispiel die physischen *Constraints*⁶⁴

⁶¹ Schröder, Dirk et al. (2010): Virtual reality system at RWTH Aachen University. Proceedings of the international symposium on room acoustics (ISRA), Melbourne Australia, 2010

⁶² Heim, Michael: The metaphysics of virtual reality. Oxford University Press, 1993, S. 154–155

⁶³ Dörner, Ralf et al. (2013): Virtual und Augmented Reality, Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität, Springer Berlin/Heidelberg, 2013, S. 18–19

⁶⁴ Der Begriff stammt aus der Informatik, bedeutet im engeren Sinne »Einschränkungen«, wird aber häufiger synonym für »Regeln« oder »Bedingungen« verwendet.

ausgeprägt sind, sich also dem natürlichen (auch hypothetischen) Verhalten der Objekte angleichen, desto plausibler oder auch glaubwürdiger wird das Erlebnis der virtuellen Umgebung. Ein Bruch dieser Glaubwürdigkeit kann beispielsweise dann passieren, wenn ein zwar vollständig abgebildeter und sich natürlich bewegendender Mensch sich plötzlich nur in abgehackten Phrasen artikulieren würde.⁶⁵

Vor allem was die Involviertheit betrifft, die den Nutzer in die virtuelle Welt einbezieht, setzt die Technologie VR tatsächlich neue Maßstäbe. Involviertheit meint vor allem den Grad der Aufmerksamkeit und des Interesses an der virtuellen Umgebung. Gewährleistet wird dies durch ihren Angebotscharakter. Für Anwendungen der Architektur muss das vor allem bedeuten, dass der Nutzer selbständig interagiert und seine Umwelt nun jederzeit selbst modifiziert. Er gewinnt an Macht gegenüber der Darstellung, indem er sich frei bewegt. – Wie viel Fremdbestimmung enthalten ist, bleibt dabei stets kritisch zu hinterfragen.

3.2.2. Salienz

Der Begriff der *Salienz* wird im Umfeld der VR genutzt, um die Steuerung der Aufmerksamkeit des Nutzers zu beschreiben. Die menschliche Wahrnehmung hat weder die Kapazitäten, noch ist es aufgrund der Fülle von Umwelteinflüssen sinnvoll, alle Reize gleichermaßen zu verarbeiten. Diese Feststellung kann von den VR-Systemen dahingehend genutzt werden, dass sie nur die Reize künstlich erzeugen müssen, auf die die Aufmerksamkeit des Nutzers gerichtet ist.⁶⁶ So können teilweise oder vollständig außerhalb des Sichtbereichs liegende Objekte während der Laufzeit mittels *Clipping*- und *Culling*-Techniken beschnitten oder ganz entfernt werden.

3.2.3. Cybersickness

Cybersickness, auch: Simulatorkrankheit, entsteht bei der Bewegung durch virtuelle Welten. Sie ist ein Resultat der Diskrepanz zwischen den tatsächlich vollzogenen Eigenbewegungen und der visuell wahrgenommenen Veränderungen der Realität (auch: *Latenz*).⁶⁷ Durch die Zunahme der die VR generierenden Rechnerleistungen, und der damit verbundenen gesteigerten Ausgabeleistung

⁶⁵ Dörner, Ralf et al. (2013): Virtual und Augmented Reality, Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität, Springer Berlin/Heidelberg, 2013, S. 18–19

⁶⁶ Ebd., S. 57

⁶⁷ Dörner, Ralf und Frank Steinicke: Wahrnehmungsaspekte von VR. In: Virtual und Augmented Reality, Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität, Springer Berlin/Heidelberg, 2013, S. 56

der benötigten Informationen, schwindet die Bedeutung der Cybersickness zusehends.

3.2.4. Diskrepanzen der Raum- und Bewegungswahrnehmung

Victoria Interrante et al. und Frank Steinicke et al. beschreiben in ihrer aktuellen Forschung zu Größen- und Distanzwahrnehmung eine Vielzahl von Problemen. So haben sie festgestellt, dass unter Anwendung derzeit verfügbarer Technologien, Probanden Distanzen in immersiven virtuellen Umgebungen um bis zu 50 Prozent unterschätzen. Ein kompensierender Effekt, der mit dem Begriff *transitional environment* bezeichnet wird, tritt ein, wenn die Probanden den sie umgebenden realen Raum als virtuelle Kopie vorfinden. Offenbar werden die in der realen Umgebung wahrgenommenen Distanzen in die virtuelle Umgebung »mitgenommen«, auch wenn die virtuelle Kopie durch das genutzte Interface eine geringere Anzahl von für das Gehirn verwertbaren Tiefenhinweisen anbietet.⁶⁸

Bei der Bewegungswahrnehmung stellen sich ähnliche Effekte der Fehlinterpretation ein. Eine Reihe von Untersuchungen zeigen, dass etwa Vorwärtsbewegungen unterschätzt und Rotationen überschätzt werden.⁶⁹

Selbstredend ist es für Anwendungen der VR im Architekturentwurf von immenser Wichtigkeit, dass Distanzen und Größen richtig vermittelt werden können. Insbesondere für den Fall, dass die VR bei Erkundungen von Entwurfsobjekten zur Beurteilung des richtigen Maßstabs genutzt werden soll. Man kann aber davon ausgehen, dass die bisher erkannten Probleme in den nächsten Jahren sukzessive gelöst werden, zumal die Industrie inzwischen in großem Umfang in die Weiterentwicklung und Perfektionierung der Technik investiert.

Auf der anderen Seite steht die Frage nach Eingabemedien für die kreative Arbeit. Durch die Entwicklungen im Bereich VR sind hier eine Reihe von vielversprechenden Ansätzen entstanden, von denen im Folgenden einige zusammengetragen wurden.

⁶⁸ Steinicke, Frank et al. (2009): Transitional environments enhance distance perception in immersive virtual reality systems. Proceedings of the 6th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization. ACM, 2009. Und: Interrante, Victoria et al. (2006): Distance perception in immersive virtual environments. Virtual Reality Conference IEEE, 2006

⁶⁹ Lappe, Markus, Michael Jenkin und Laurence R. Harris: Travel distance estimation from visual motion by leaky path integration. Experimental Brain Research 180.1, 2007, S. 35–48. Und: Steinicke, Frank, et al. (2010): Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques." Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on 16.1, 2010, S. 17–27

3.3. Immersive Entwurfsumgebungen

Zusammengefasst sind es die folgenden Charakteristika, die derzeit die Technologie VR beschreiben:

- Echtzeit-Rendering dreidimensionaler, dynamischer, fotorealistischer Grafiken
- Immersion
- Präsenz, insbesondere Involviertheit
- Autonomie bei der Bedienung
- Erfassung von Gesten
- und die Möglichkeit von Kollaboration, eingeschlossen Telepräsenz.

Vom Standpunkt des entwerfenden Architekten aus gesehen wirken sich diese Charakteristika idealerweise wie folgt aus:

Der Grad der räumlichen Abstraktion ist nach den Bedürfnissen des Anwenders frei wählbar. Somit auch der Anteil zweidimensionaler Informationen, die gegebenenfalls benötigt werden, um eine dreidimensionale Umgebung zu verstehen. Während der Entwerfer dadurch von einer unnötigen mentalen Tätigkeit befreit wird, wird ihm gewährt, sich stärker auf das Entwurfsproblem und auf zunehmend komplexere Aufgaben zu fokussieren. Die VR ist ein effektives Werkzeug, um einen stetigen Fluss von visueller Rückinformation zu generieren, insbesondere bei der Einschätzung der räumlichen Wirkung der Entwurfsobjekte. Das Feedback hilft, auf eine im Vergleich zu traditionellen Medien neue Weise, das Entwurfsergebnis zu verbessern und die Anzahl der Fehlentscheidungen zu verringern.⁷⁰

VR erlaubt dem Entwerfer intuitive Kontrolle über das dreidimensionale Objekt des Entwurfs. Er kreiert seine virtuelle Umgebung von »innen heraus«.⁷¹ Gestaltung wird zum erfahrbaren Prozess, weil der Entwerfer mit den Konsequenzen seiner Entscheidungen konfrontiert wird. Diese Verbesserung ist vor allem der Frequenz geschuldet, in der er mit Rückinformationen konfrontiert wird. Sie führt zu einer korrespondierenden Beschleunigung im rekursiven Kreislauf aus Hypothese, Schöpfung, Feedback und Modifikation.⁷²

Mit der VR wird auch eine deutlich stärkere Bindung an das Objekt des Entwurfs erreicht, wenn beispielsweise die natürlichen (Hand-)Bewegungen des

⁷⁰ Vgl. auch Okeil, Ahmad: Hybrid Design Environments. Immersive and Non-Immersive Architectural Design, in ITcon, Vol. 15, 2010, S. 204

⁷¹ Kuhlen, Thorsten: Virtuelle Realität. In Schmitz, Thomas H. und Hannah Groninger (Hrsg.): Werkzeug – Denkzeug. Manuelle Intelligenz und Transmedialität kreativer Prozesse. [transcript] Bielefeld, 2012, S. 288f.

⁷² Vgl. auch Okeil, Ahmad: Hybrid Design Environments. Immersive and Non-Immersive Architectural Design, in ITcon, Vol. 15, 2010, S. 204

Nutzers übersetzt werden und die unmittelbare Manipulation des Entwurfsgegenstands ermöglicht wird. Diese Funktionsweise integriert die Genese digitaler Modelle in der gleichen Weise wie Skizzieren und Zeichnen oder die Arbeit mit physischen Arbeitsmodellen. VR als Medium der Darstellung wirkt sich dabei auf weitere kognitive Aspekte des Anwenders aus. Die Exploration virtueller Umgebungen kann das körperliche Denken stimulieren, indem es ein tieferes Verständnis von Ort und Raum erzeugt.⁷³

Auch bei der Integration der vernetzten Zusammenarbeit stellt die VR einen Evolutionsschritt bereit. Durch Telepräsenz arbeiten (real-)räumlich getrennte Nutzer gleichzeitig im selben Projekt. Sie nehmen ihre körperliche Präsenz gegenseitig wahr und arbeiten so, als ob sie sich im selben Raum befänden. Die durch diese neue Form der Kommunikation implizierte Gleichzeitigkeit hat ganz eigene Auswirkungen auf die Arbeit an Entwurfsobjekten.

3.3.2. Defizite

Das primäre Ziel vieler Bestrebungen in der Entwicklung von Anwendungen ist nicht die Einführung einer weiteren Darstellungsmethode, der VR also die Rolle eines passiven Mediums zuzuweisen und mehr oder weniger ans Ende des Entwurfsprozesses zu stellen, sondern sie von Anfang an, also bei allen Tätigkeiten einzusetzen, die den Entwurf erzeugen. Immersive Entwurfsumgebungen sollen ein Gefühl von »In-der-Welt-sein« erzeugen. Sie bieten dem Entwerfer dafür die räumliche Wahrnehmung der von ihm als Entwurfsproblem eingegrenzten Umgebung. Im realistischen Maßstabsverhältnis der Person zum Gebäude erlauben die Systeme genau den Raum zu »skizzieren«, in dem man sich befindet. Der Vision vieler Entwickler nach kreieren manuelle Gesten Wände, Öffnungen und Decken; Geschosse und Treppen werden hinzugefügt und entfernt. Aus einem intuitiv steuerbaren Blickwinkel werden die Details untersucht, während alle Entscheidungen auf der direkten Wahrnehmung basieren.

3.2.3. Verfügbarkeit

Die meisten der zur Verfügung stehenden Setups sind bisher nicht mehr als Darstellungsprogramme mit der Option visueller Exploration und der Einbindung von überlagerten Informationen. Für die Anzeige von 3D-Modellen als IVEs werden stereoskopische Render-Engines genutzt, die zwar über Navigationstools verfügen, aber bisher nur selten Werkzeuge für die Modifikation von Objekten. Exploration und das Versetzen von Objekten ist vom Gestalterstandpunkt aus gesehen noch keine wirkliche Interaktion. Die Aufgabe bleibt deswe-

⁷³ Vgl. auch: Okeil, Ahmad: Hybrid Design Environments. Immersive and Non-Immersive Architectural Design, in ITcon, Vol. 15, 2010, S. 204

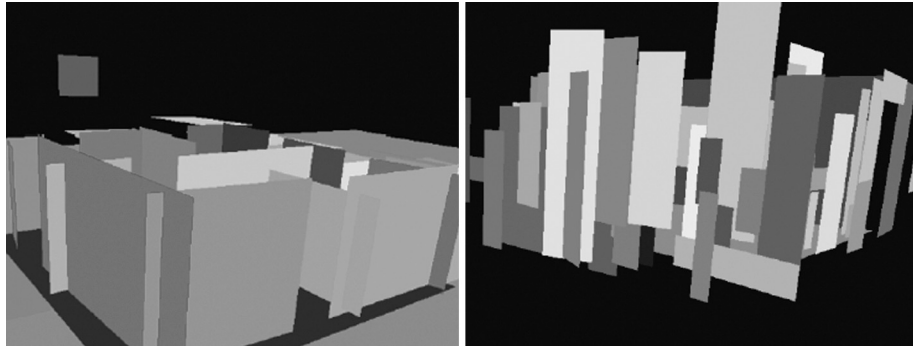


Abb. 1/2 Räumliche Arrangements aus planeDesign

gen, »echtes« Entwerfen in virtuelle Umgebungen zu integrieren und die entstehenden Anwendungen so einfach und intuitiv wie möglich zu gestalten. Bisher muss der Entwerfer, sobald er die VR betritt, die mächtige, digitale Werkzeugpalette zurücklassen, an die er gewöhnt ist. Diese Lücke zu schließen und die Palette der Werkzeuge auch in der VR bereitzustellen, ist Inhalt einer Vielzahl von Ansätzen aus der Literatur:

Das beispielsweise von Dirk Donath und Holger Regenbrecht an der *Bauhausuniversität Weimar* Ende der neunziger Jahre vorgestellte *voxDesign*-Werkzeug ist eine Arbeitsumgebung, die sich darauf konzentriert, mithilfe von 3D-Skizzierwerkzeugen räumliche Strukturen zu erzeugen. Auf der Entwicklung einer intuitiven Palette dieser Werkzeuge lag besonderes Augenmerk. Sie ist so umfassend, dass auf zusätzliche Eingabemethoden verzichtet werden konnte. Neben *voxDesign* entwickelten Donath und Regenbrecht mit *planeDesign* ein Werkzeug für die Konzeptphase des Entwurfs: Durch das Verschieben von Flächen lassen sich hier auf einfachste Weise räumliche Situationen erzeugen und untersuchen (Vgl. Abb. 1 u. 2).⁷⁴ Die Anwendung repliziert eine Entwurfsmethode, die im Architekturstudium auch gerne als »Bierdeckelmethode« Erwähnung findet. »Der Architekt sollte in die Lage versetzt werden, Raumdefinitionen und Raumanordnungen im Maßstab 1:1 unmittelbar aus seinen Gedanken und Intentionen heraus auszudrücken. Kein Menü, kein Start- und Endsymbol, keine Angaben von exakten Maßen. Einzig Proportionen, Anordnungen und Formen in einer Detailgenauigkeit, wie sie dieser ersten Phase des Entwurfes entspricht: grob, ungefähr, abschätzend, verwerfend, dokumentierend. Nicht mehr, nicht weniger. Genau dafür reichen solche einfachen Flächen (»planes«) aus.«⁷⁵

⁷⁴ Donath, Dirk und Holger Regenbrecht: Der Bleistift im 21. Jahrhundert. Das architektonische Entwerfen in interaktiven VR-Umgebungen. Erfahrungen im Entwerfen von Raumsituationen mit einem immersiven Virtual-Reality-System. Proceedings Architektur im Informationszeitalter, Stuttgart, 1999

⁷⁵ Ebd.: S. 6

Sowohl Dobson als auch Coomans und Oxman schlagen Methoden vor, die auf einer Bibliothek vorgefertigter Architekturelemente basieren. Durch Zusammenstellung von dreidimensionalen Standardrepräsentationen werden architektonische Kompositionen erzeugt. Damit hat diese Anwendung Ähnlichkeit zu konventionellen CAAD-Programmen wie beispielsweise *ArchiCAD* (*Autodesk*). Die von ihnen beschriebenen Ansätze schließen die Gestenerfassung als Auslöser von Kommandos ein.⁷⁶

In der Herangehensweise, die Ahmad Okeil umreißt, werden immersives und nicht-immersives Arbeiten als hybride Anwendung verschränkt. Der Architekt nimmt die gewohnten digitalen Werkzeuge in seine immersiven Umgebung mit, also in das Objekt des Entwurfs. Während des Entwurfsprozesses hat er permanenten, optionalen Zugriff auf skalierte zweidimensionale Darstellungen, um auch in ihnen Objekte zu erstellen, zu verändern und zu bewegen. Durch die Integration in die virtuelle Umgebung springt er nicht zwischen den Medien hin und her, spart Zeit und Aufwand. Zugleich steht ihm das bereits erwähnte visuelle Feedback zur Verfügung, und er hat die Möglichkeit zur Modifikation von Details. Für den globalen Überblick werden ihm Übersichtspläne, Grundrisse und Schnitte angezeigt während er zeitgleich den Ort im Abbildungsmaßstab 1:1 exploriert.⁷⁷

Auch für die Integration des Skizzierens in die VR existieren Vorschläge: Ellen Yi-Luen Do beispielsweise stellte 2001 das *VR-Sketchpad* vor als virtuelle Freihand-Zeichenunterlage. Auf einfache Weise werden hierbei aus diagrammatischen Skizzen von beispielsweise räumlichen Aufteilungen Wände, Stützen und Möblierungen generiert. Die Anwendung interpretiert dank kluger Algorithmen Skizzen selbstständig in dreidimensionale Objekte, die in einem *VRML-Player* und somit in der VR angezeigt werden können.⁷⁸

Dorta, Perez et al. haben mit der *immersive Drafted Virtual Reality (iDVR)* ebenfalls eine Art Hybrid entwickelt, der eine immersive Umgebung nutzt. Der Vorschlag integriert eine Skizzierfunktion in eine immersive Umgebung. In einem sphärischen Panorama besteht die Möglichkeit auf ein zweidimensionales Interface zu zeichnen. Die Zeichnungen werden auf eine zylindrische Projek-

⁷⁶ Dobson, Adrian: Exploring conceptual design using CAD visualisation and virtual reality modelling.. Computerised Craftsmanship-16th Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe, eCAADe, Paris, 1998, und Coomans, Mik D., und R. M. Oxman: Prototyping of Designs in Virtual Reality. Proceedings of the 3rd Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning Conference, 1996

⁷⁷ Okeil, Ahmad: Hybrid Design Environments. Immersive and Non-Immersive Architectural Design, ITcon, Vol. 15, 2010, S. 211

⁷⁸ Do, Ellen Yi-Luen: VR sketchpad. Computer Aided Architectural Design Futures 2001. Springer, 2001, S. 161–172



Abb. 3–6 Multi-User-Interaktion im VR-Lab der Bauhausuniversität Weimar

tionswand übertragen. Das Produkt ist allerdings nicht mehr, als eine statische Panoramaprojektion.⁷⁹

Zum Thema Multi-User-Interaktion kommen sehr eindrucksvolle technologische Aussichten wiederum von der *Bauhausuniversität Weimar*. Das Team um Bernd Fröhlich realisiert kollaborative Interaktion unter Einbeziehung von Telepräsenz. So können durch das dort entwickelte Framework mehrere Nutzergruppen, die an unterschiedlichen Orten dreidimensional von Infrarot-Tiefenkameras erfasst werden, in der selben virtuellen Umgebung aufhalten und in Echtzeit interagieren (*Vgl. Abb. 3–6*). Eine Reihe von Werkzeugen steht für die Manipulation des optischen Interfaces zur Verfügung, und die Ausgabe auf mehrere Displays und Projektionsleinwände ist möglich.⁸⁰

Ebenfalls auf die Erfassung von Körperbewegungen mittels einer Infrarotkamera setzt die Entwicklung der Firma *Leap Motion*. Der entwickelte Controller soll die Eingabe durch klassische Interfaces, vor allem der Maus überflüssig machen, indem er die Handbewegungen erfasst und durch komplexe Algorithmen »versteht«. Das erst seit knapp zwei Jahren erhältliche Produkt lässt sich mit dem HMD *Oculus Rift* verbinden, wodurch virtuelle Repräsentationen der eigenen Hände und Unterarme in der VR sichtbar werden. Erste Demos zeigen den Einsatz für Selektion und räumliche Modellierung von virtuellen Objekten und Objektgruppen (*Vgl. Abb. 7 u. 8*).

⁷⁹ Dorta, Tomas, Edgar Perez und Annemarie Lesage: The ideation gap. Hybrid tools, design flow and practice. *Design Studies* 29.2, 2008, S. 121–141

⁸⁰ Beck, Stephan, André Kunert, Alexander Kulik und Bernd Froehlich: Immersive group-to-group telepresence. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions*, 2013, S. 616–625.

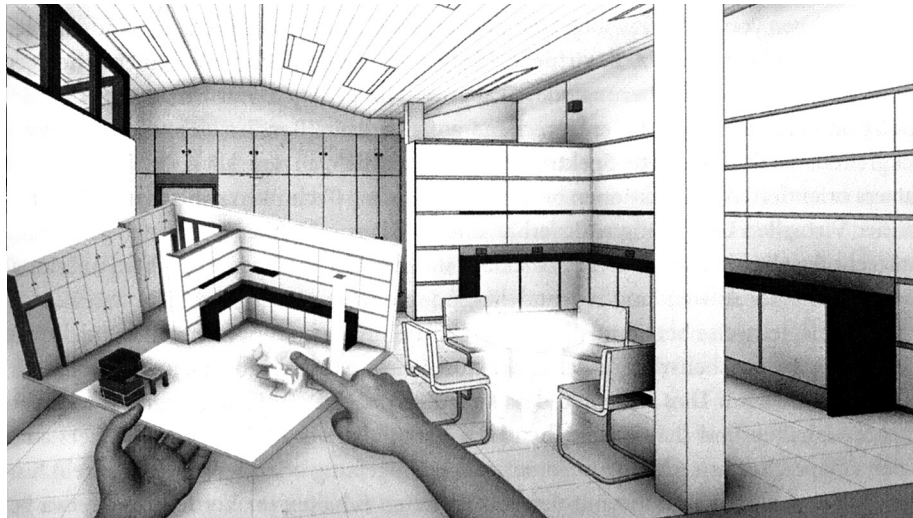


Abb. 9 Beispiel für die Selektion von Objekten in einer World-In-Miniature-Darstellung: Der Nutzer selektiert ein im verkleinerten Modell abgebildetes Objekt.

All diese Ansätze – die Liste ließe sich fortsetzen –, wie auch immer sie funktionieren, bieten nie den vollen Funktionsumfang eines konventionellen CAAD-Programms. Als Resultat sind die Ergebnisse bei weitem nicht so zufriedenstellend, wie jene konventioneller Programme und ihrer fotorealistischen Renderer. Wie auch immer die Vermittlung zwischen den Funktionen aussieht, idealerweise sitzt die Option der immersiven Darstellung und der dreidimensionalen körperlichen Eingabe auf einer mächtigen CAAD-Anwendung auf, die die Arbeit auf multiplen Bildschirmen und die Eingabe durch verschiedenen Interfaces integriert. Eine derartige Software wäre dringend zu isolieren, damit die VR den architektonischen Entwurfsprozess signifikant verbessern kann.

Das Aufsitzen auf einer bestehenden Anwendung hätte auch weitere Vorteile: So würde das gesamte Funktionsrepertoire von CAAD auch in der VR bereitstehen. Es umfasst 3D-Modeling, wahlweise aus *egozentrischer* oder *exozentrischer* Perspektive, zweidimensionale Zeichenfunktionen, Objektbibliotheken und Parametrisierbarkeit generativer Formfindungsalgorithmen. Mit der Integration von KI-Modulen würden Simulationen und automatische Optimierungsvorgänge möglich werden. Sprachsynthese und Gestenerfassung erledigen den Abruf von Befehlen und Menüs und die räumliche Eingabe.

3.4. Die hypothetische Anwendung – offene Fragen

Immersive virtuelle Umgebungen, die eine Interaktion erlauben, sind derzeit noch auf einem experimentellen Entwicklungsstand. Im Folgenden werden einige der auftauchenden Fragen zusammengefasst. Schnelle Antworten gibt es

keine, aber eine Reihe von Lösungsansätzen macht neugierig auf die weitere Entwicklung.

3.4.1. Skalierung, Maßstab und Orientierung

Architekten sind es gewohnt, ihr Projekt im selbstgewählten Maßstab zu bearbeiten und diesen Maßstab auch jederzeit ändern zu können. CAAD-Programme beschleunigen diese Vorgehensweise, die dazu dient, sehr unterschiedliche Aspekte des Entwurfs zu analysieren und zu bearbeiten. In einer immersiven Umgebung ist die Wahrnehmung des Entwerfers auf das Projekt, in dem er sich befindet, deutlich eingeschränkt. Umgeben von Raum und seiner Grenzen büßt er die globale Übersicht ein. Wenn er dann beispielsweise eine Wand im aktuellen Raum verschiebt, um seine Tiefe zu ändern, löst er zwar ein Problem an dieser Stelle. Die resultierenden Probleme auf der anderen Seite der Wand sieht er aber nicht.

Immersion erzeugt häufig eine Desorientierung der Nutzer, weil sie die Verbindung zum globalen Bezugssystem verlieren. Ein Problem ist die freie Rotation der virtuellen Weltkoordinaten. In der Realität nutzen Menschen Karten, Pläne und Beschilderungen, um zu navigieren, auch dreht sich ihre Welt nicht einfach so. In immersiven Umgebungen benötigen Nutzer ähnliche Hilfestellungen, alternativ bleibt die Ausrichtung zur virtuellen Umgebung immer gleich oder wird eindeutig signalisiert.

Ein Lösung für die Orientierung in der VR könnte die sogenannte *World-In-Miniature*-Technik (WIM) sein. Die virtuelle Umgebung wird dabei so herunterskaliert, dass sie als verkleinerte Version in das Sichtfeld des Benutzers passt. Auf diese Weise wird eine *exozentrische* in eine *egozentrische* Weltsicht integriert (Vgl. Abb. 9).⁸¹ Manipulation im verkleinerten *und* im umgebenden Modell wirken sich gleichzeitig aufeinander aus. Das Werkzeug des virtuellen Architekturmodells wird dadurch doppelt als visuelle Repräsentation benutzt. Durch WIM könnten auch die gewohnten zweidimensionalen Darstellungsformen, also Grundrisse und Schnittdarstellungen, in dynamisch veränderbaren Ebenen, ähnlich der aus CAAD bekannten *Bounding Boxes*, integriert werden. WIM löst damit auch Probleme der Selektion von Objekten und der generellen Interaktion im Modell.

3.4.2. Interaktion und Selektion

⁸¹ Dörner, Ralf, Christine Geiger, Leif Oppermann und Volker Paelke: Interaktion in virtuellen Welten. In: Virtual und Augmented Reality, Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität, Springer Berlin/Heidelberg, 2013, S. 165

Abb. 10 Eine Frage des Maßstabs

Es ist nicht ganz einfach, in einer räumlichen Darstellung Objektpositionen exakt einzuschätzen. Besonders die Ausdehnung großer oder weit entfernter Objekte präzise zu bestimmen und zu ändern, gestaltet sich schwierig. Auch *drag-and-drop*, die vielleicht beliebteste Operation in Computerprogrammen, wird in einer immersiven Umgebung zur echten Herausforderung: Sobald die physischen Constraints, wie etwa Entfernung, Zeit und Sichtbarkeit vollständig simuliert werden, ist diese Operation auch eine *physische* Belastung. Sie würde nämlich am Beispiel der Architektur erfordern, ein selektiertes Objekt, nach Abschaltung aller Kollisionssimulationen, durch Türen, Korridore, Treppenhäuser und weite Räume zu zerren, um letztlich an der gewünschten Zielposition anzukommen. Das Problem wächst zusehends mit komplexer werdenden Objekten, Objektgruppen und Bauwerksstrukturen. Vorausgesetzt, die Steuerung könnte durch eine Gestenerfassung erfolgen, würde dem Anwender umfangreiche körperliche Tätigkeit abverlangt (Ziehen, Schieben, Drehen, die Kontrolle aus verschiedenen Blickwinkeln etc.). – Keine schlechten Aussichten für die Arbeitsmedizin.

Um derlei Probleme anzugehen, wurde etwa das Konzept der *Teleportation* entwickelt, das ermöglicht, Objekte vom Standort des Nutzers an andere Positio-

nen in der virtuellen Umgebung zu senden. Diese Funktion ist allerdings nur praktikabel auf der Grundlage eines globalen Orientierungssystems, welches sicherstellt, dass die Objekte auch dort ankommen, wo der Anwender sie wirklich haben will.

Für die Selektion der Objekte, die modifiziert werden sollen, kann zwischen *nahen* und *entfernten* Interaktionstechniken unterschieden werden. Die proximale Interaktion entspricht eher dem, was der Anwender aus einer realräumlichen Arbeitsweise gewöhnt ist. In der VR lässt sich aber auch die Interaktion mit Objekten über größere Distanzen realisieren, die normalerweise außerhalb der natürlichen Reichweite liegen.⁸² Vergleichbar mit einem Kranführer, der weit entfernte Objekte präzise bewegen soll, kann man hierbei von distalen Handlungen sprechen, deren Effekte vom Nutzer verstanden werden müssen.

Besonders schwierig gestaltet sich die distale Selektion aus einer zentralen Nutzerperspektive: Das System muss erkennen, welches Objekt gemeint ist. Anhaltende Fehlinterpretationen durch den Computer würden zu Frustration führen. Nun könnte man »auf die Idee kommen, die Selektion, grade über größere Entfernung [mittels *Eye-Tracking*] mit den Augen vollziehen zu wollen: immerhin kann man weiter schauen als greifen und sehr schnell fokussieren. [In Versuchen] hat sich aber herausgestellt, dass eine generelle Selektion nur mit den Augen für den Nutzer nicht komfortabel ist. [...] [Er könnte] nirgendwo hinblicken, ohne dass er unbeabsichtigt etwas selektiert.«⁸³ Robert Jacob spricht vom *Midas Touch Problem*⁸⁴, weil König Midas alles, was er berührte, in Gold verwandelte. Eines Tages versehentlich sogar seine Tochter.

3.4.3. Darstellung

Während die perspektivische und fotorealistische Darstellung des Entwurfsobjekts dem Nutzer dabei helfen kann, seinen Entwurf zu bewerten, wird diese Darstellungsform womöglich die konzeptionelle Entwurfphase und die Genese von Ideen behindern – ein ähnliches Problem wie bei der Nutzung von CAAD-Anwendungen. Es müssen also neue Darstellungskonzepte gefunden werden, die Unschärfe und Offenheit signalisieren. Gerade hier sind die Architekten gefragt, ihre Vorstellungen an Interfacedesigner zu vermitteln.

⁸² Dörner, Ralf, Christine Geiger, Leif Oppermann und Volker Paelke : Interaktion in virtuellen Welten. In: Virtual und Augmented Reality, Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität, Springer Berlin/Heidelberg, 2013, S. 160 f.

⁸³ Dörner, Ralf, Christine Geiger, Leif Oppermann und Volker Paelke : Interaktion in virtuellen Welten. In: Virtual und Augmented Reality, Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität, Springer Berlin/Heidelberg, 2013, S. 163

⁸⁴ Jacob, Robert JK: What you look at is what you get. Eye movement-based interaction techniques. Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems. ACM, 1990

3.4.4. Ergonomie

Immersive Entwurfsumgebungen werden entwickelt um den Nutzer in darin einzuschließen. Die meisten Anwendungen erfordern zumindest den zeitweiligen Aufenthalt in ihnen. Möglicherweise wird einst der gesamte Arbeitstag in ihnen verbracht. Bisher ist zugegebenermaßen wenig über die Auswirkung längerer Aufenthalte in der VR bekannt. Die stehende Haltung und die für die Interaktion notwendigen Hand- und Armbewegungen führen merklich zu Ermüdungserscheinungen. Auch gibt es erste Anzeichen, dass aus der länger andauernde Benutzung eine Senkung der Produktivität resultiert, deren Ursache bisher unbekannt ist.⁸⁵

–

Durch meine Annäherung an das Thema virtueller Entwurfsumgebung für Architekten wurde mir schnell klar, dass die ergiebigsten Ansätze immer dann entstehen, wenn Programmierer, Interfacedesigner und Entwerfer unmittelbar zusammenarbeiten. Denkt man beispielsweise an die Entwicklungen, die von großen Architekturbüros angestoßen wurden, wie beispielsweise *AES (IBM Architectural & Engineering Series)* – eine CAAD-Arbeitsumgebung, die maßgeblich durch *Skidmore, Owings and Merrill* bis Mitte der neunziger Jahre mitentwickelt wurde;⁸⁶ oder an *Gebry Technologies*, dessen Gründer Frank Gehry ab 2002 ein eigenes Werkzeug für seine komplexen Entwurfsprojekte zusammenstellen ließ, so zeigt sich, dass Architekten mithilfe der von ihnen formulierten Anforderungen ihre Werkzeuge selbst gestalten können.

Ein beliebtes Beispiel ist übrigens auch die Erfindung des Bleistifts durch den Hofarchitekten Joseph Hardtmuth Ende des 18. Jahrhunderts. Aus einer Unzufriedenheit mit den gängigen Stiften heraus probierte er neue Herstellungsverfahren für Graphit, die zu einem bis heute unveränderten Resultat führten.⁸⁷

Mit der Weiterentwicklung der VR und den assoziierten Entwurfswerkzeugen müssen sich Architekten beschäftigen. Mit den im Rahmen dieser Arbeit

⁸⁵ Vgl. auch: Kuhlen, Thorsten: Virtuelle Realität. In Schmitz, Thomas H. und Hannah Groninger (Hrsg.): Werkzeug – Denkzeug. Manuelle Intelligenz und Transmedialität kreativer Prozesse. [transcript] Bielefeld, 2012, S. 289. Und: Okeil, Ahmad: Hybrid Design Environments. Immersive and Non-Immersive Architectural Design, ITcon, Vol. 15, 2010, S. 210f.

⁸⁶ Temel, Robert: Mittel und Zweck. In: Krasny, Elke (Hrsg.): Architektur beginnt im Kopf. The making of architecture. Birkhäuser Basel, 2008, S. 140

⁸⁷ Temel, Robert: Mittel und Zweck. In: Krasny, Elke (Hrsg.): Architektur beginnt im Kopf. The making of architecture. Birkhäuser Basel, 2008, S. 140

durchgeführten Experimenten habe ich versucht, die Bedeutung dieser Technologie für die Architektur zu verstehen.



Abb. 11 Haupthalle der Universität der Künste Berlin

4. Experiment

Die Architekturdarstellung ist dem Einfluss sich stets weiterentwickelter künstlerischer Ausdrucksformen ausgesetzt. Deren Wirksamkeit bei der Vermittlung von Architektur ist aufgrund des riesigen Parameterraums der relevanten Variablen schwer, wenn überhaupt, quantifizierbar. Das probate Mittel der Bewertung von diesen künstlerischen Ausdrucksformen ist deswegen meines Erachtens immer noch die Diskussion. Als durchaus quantitativ erfassbar erscheint mir jedoch die Validität von Darstellungsmethoden bei der Repräsentation von physischem Raum, durch vergleichende Gegenüberstellung.

Die VR erlaubt eine Emanzipation von vorgegeben Perspektiven, indem der Betrachter nicht mehr nur betrachtet, sondern selbstständig exploriert. Die Wesensmerkmale eines durch Geometrie, Formensprache, Belichtung und Atmosphäre definierten architektonischen Raums sind vom Urheber oft anders gemeint, als sie vom Nutzer interpretiert werden. Die VR als Werkzeug des Architekturentwurfs taugt daher auch dazu, dem Entwerfer diese Unterschiede begreiflich zu machen.

4.1. Fragestellung

In einem Experiment sollte die Wirkung und das Verständnis eines realen Raumes mit der Wirkung und dem Verständnis seiner virtuellen Repräsentation verglichen werden. Im ersten Teil des Experiments wurden Probanden, die entweder den realen oder den virtuellen Raum explorierten, mit der gleichen Aufgabe konfrontiert: Sie sollten zunächst fünf Standorte wählen und die damit verbundenen Perspektiven, die den Raum bestmöglich repräsentieren, fo-



Abb. 12 Einbauten der Lichthöfe

tografisch dokumentieren. Danach sollten sie aus vier Grundrissen den auswählen, der dem explorierten Raum entspricht. Die Aufgabenstellung »Fotografieren« wurde gewählt, um den Probanden im realen Raum zu ermöglichen, annähernd genau so ungezwungen zu explorieren, wie es von Probanden in der VR bekannt ist. Unter dem Schutz der Kamera ist es sozial akzeptabel, sonst als merkwürdig eingestuftes Verhalten zu zeigen. Die Exploration eines virtuellen hingegen ist automatisch privater.

Wenn die Vorhersage richtig ist, dass der virtuelle Raum den realen Raum architektonisch adäquat abbildet, erwartete ich, dass die Übereinstimmung der fotografischen Repräsentationen zwischen den Probandengruppen (virtuelle Exploratoren und reale Exploratoren) sich nicht stärker unterscheiden als innerhalb der Gruppen. Zusätzlich erwartete ich, dass in beiden Gruppen die Einschätzung, welcher Grundriss der richtige ist, ähnlich sind, also richtige und falsche Antworten in beiden Gruppen ebenso häufig sind. Zudem sollten womöglich Übereinstimmungen im Explorationsverhalten beobachtet werden können.

4.2. Methode

4.2.1 Probanden

Die Probanden waren Architekturstudierende beiderlei Geschlechts im Alter zwischen 24 und 30 Jahren. Eine Gruppe waren Studierende der *Universität der Künste (I)*. Die andere Gruppe waren Studierende der *Bauhausuniversität Weimar (II)*. Beide Gruppen bekamen dieselbe Aufgabe; *Gruppe I* im Realraum; *Gruppe II* im virtuellen Raum, ohne Kenntnis des Realraums.



Abb. 13 Quergalerie

4.2.2. Ort

Die Haupthalle und Quergalerie der *Universität der Künste* in der Berliner Hardenbergstraße wurde aufgrund der besonderen räumlichen Gegebenheiten und dem historischen Bezug gewählt. (Abb. 11–14)

Die Haupthalle ist der größte und wohl eindrucksvollste Raum des zwischen 1898 und 1902 vom Büro *Kayser & von Großheim* geplanten Hauptgebäudes der *Königlichen akademischen Hochschule für die bildenden Künste*. Er dient bis heute als Vorraum der Erschließung, Wandelhalle und, gemeinsam mit der sich im hinteren Teil anschließenden Quergalerie, als wichtiger Ausstellungsraum der Fachbereiche Bildende Kunst und Architektur. Die Quergalerie wurde im Jahr 1954 durch Wilhelm Brüning auf der Grundfläche im Weltkrieg zerstörter Gebäude Teile angefügt. Die Überbauung der seitlichen Lichthöfe erfolgte vermutlich zu Beginn der sechziger Jahre. Die Urheberschaft ist ungeklärt.⁸⁸

Die Haupthalle besticht durch ihre Großzügigkeit. Die unterschiedlichen Gewölbe und deren gleichmäßige Ausleuchtung und die acht freistehenden – insgesamt zwölf – Pfeiler rufen eine Tiefenwirkung hervor, die den Eindruck eines Kontinuums evoziert, dessen Begrenzungen schwer zu definieren sind. Die Wandflächen sind durch 52 Halbpilaster, in Abschnitten reiche Dekore, sowie Architrave um Türen strukturiert. Der Gewölbescheitel liegt bei etwa 8,30 Metern. Die umlaufend verglasten Lichthof-Einbauten (ca. 3,30 m Höhe) und die hochliegenden Fenster sorgen für einen kontrollierten Lichteinfall. In der

⁸⁸ Bollé, Michael: *Der Campus. Ein Architekturführer durch das Gelände der Hochschule der Künste und der Technischen Universität Berlin*. Arenhövel Verlag Berlin, 1994, S. 22ff.



Abb. 14 Pfeiler

sachlicher gestalteten, die Symmetrielängsachse fortsetzenden Quergalerie (ca. 4,50 m Höhe), sorgt ein sich an die zwischen Wänden und Decke überblendende Rundung anschließendes Oberlicht-Band für eine ebenso gleichmäßige Ausleuchtung.

Die Haupthalle ist zweifach axial-symmetrisch angelegt. Diese Symmetrie und die serielle Staffelung der Abschnitte sowie die Sichteinschränkung durch die Pfeiler führen zu sehr unterschiedlichen und schwer zu einem Gesamtverständnis zu synthetisierenden Isovisten⁸⁹. Dies mag der Grund sein, warum Studenten auch nach langjähriger Benutzung teilweise desorientiert sind und zum Beispiel die »falsche« Treppe benutzen.

Der schematische Grundriss wurde für das Experiment in unterschiedlicher Stärke verändert. Alle Varianten erhielten jeweils eine zählbare und eine proportionalen Manipulation, so dass Raumtiefen und die Anzahl von Pfeilern unterschiedlich waren. (→ *Anhang 1*)

4.2.3. Technische Implementierung

In Kooperation mit der Berliner Firma *Plan3D GmbH* wurde ein detaillierter 3D-Scan (\varnothing 0,3 cm Auflösung) der Geometrie der gesamten Haupthalle erstellt.

⁸⁹ Betrachten ließe sich an dieser Stelle das in der algorithmischen Geometrie beschriebene Sichtbarkeitsproblem, auch: Problem der Museumswächter (engl.: art gallery problem). Siehe dazu auch: Zoltán Füredi und D. J. Kleitman: The prison yard problem. In: *Combinatorica* 14, Nr. 3, 1994, S. 287–300. Und: Suleiman, Wassim, Thierry Joliveau und Eric Favier: A New Algorithm for 3D Isovists, *Advances in Spatial Data Handling*, Springer Berlin/Heidelberg, 2013, S. 157–173

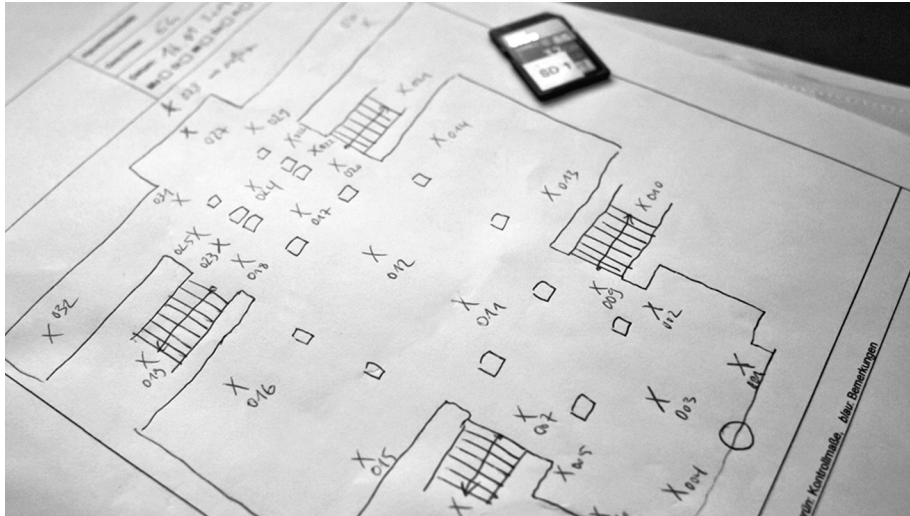


Abb. 15 Scannerpositionen

Mit dem *FARO Focus 3D-Scanner* (*FARO Europe GmbH*) wurden 33 Einzelscans (*Abb. 15*) erzeugt, die durch Kalibrierung und Registrierung in der Software *FARO Scene* in eine 885 Millionen Punkte umfassende, kolorierte Punktwolke zusammengefasst wurden (*Abb. 16*). Auf Grundlage dieser Daten wurden mit der Software *PointCab* (*PointCab GmbH*) Grundriss- und Schnittdarstellungen erzeugt, die der Rekonstruktion eines idealisierten 3D-Modells in der NURBS-Modellierungssoftware *Rhinoceros 3D* (*Robert McNeel & Associates*) dienen.

Das NURBS-Modell von Haupthalle und Quergalerie wurde aus *Rhino* im *MotionBuilder*-Format (*fbx*) exportiert, um es für die Laufzeit- und Entwicklungsumgebungen *Unity* nutzbar zu machen. Mit der Einbindung des *Oculus Software Development Kits* ist die Kompilierung der virtuellen Umgebungen für das Head Mounted Display (HMD) *Oculus Rift* (*Oculus VR*) gewährleistet. Eine mit der massiven Reduktion der Polygonanzahl (um bis zu 66 %) einhergehenden Optimierung der Polygonnetze in Level-of-Detail-Stufen (LODs) erfolgte mit der Software *Simplygon* (*Donya Labs AB*).

Die virtuelle Umgebung wurde auf dem HMD *Oculus Rift Development Kit II* präsentiert (1920 x 1080 px @ 75 Hz, 40° diagonales Sichtfeld). Das Gerät integriert einen 3-Achsen-Gyrometer und Beschleunigungssensoren zur Messung der Kopfdrehung (Rotation). Das externe *Tracking* durch eine Infrarotkamera erfasst zudem Bewegungen des Oberkörpers. Die Sensoren des *Oculus Rift* arbeiten mit einer Abtastfrequenz von 1000 Hz, was die Verzögerungszeiten (Latenzen) minimiert. Angeschlossen wurde das Display an einen Intel Computer (Dual-Core-Prozessor, 16 GB RAM, *nVidia GeForce GTX 970*).

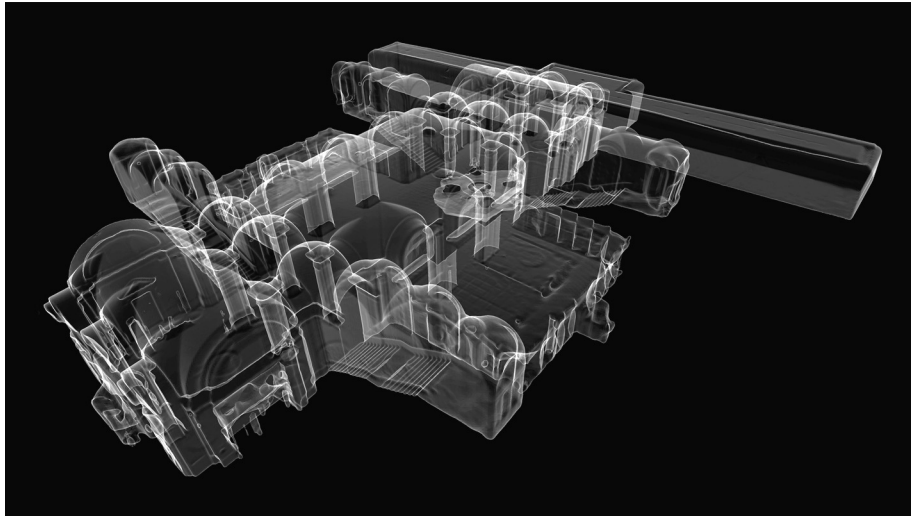


Abb. 16 Bereinigte Punktwolke als Ergebnis des Scanvorgangs

Das Explorationsverhalten in der virtuellen Umgebung ist zum Zweck der Vergleichbarkeit mit der realen Exploration auf eine natürliche Bewegungsgeschwindigkeit und Augenhöhe begrenzt, wobei der durch das Tracking abgebildete Bereich, ein Beugen des Oberkörpers und die Exploration aus der Hocke ermöglichen. Die Bewegungssteuerung (Laufen, optional Drehen) erfolgte mit dem kabellosen *Xbox-360-Game-Controller (Microsoft)*. Bei der Konfiguration des virtuellen Ausgabemediums HMD wurden personalisierte Werte für den Pupillenabstand im Bereich von 62 mm bis 67 mm und der Augenhöhe im Bereich 1600 mm und 1750 mm (im Stand) voreingestellt, da sich beide Werte auf die Tiefenwahrnehmung auswirken.⁹⁰ Zur Anpassung wurde das *Oculus Configuration Utility* genutzt. Es bietet eine auf statistischen Ermittlungen basierende Anpassung der vorgenannten Werte durch die Vorauswahl von Körpergröße und Geschlecht.

4.2.4. Darstellung

Mit dem idealisierten Modell aus *Rbino 3D* wurde ein ästhetisches Konzept formuliert, das versucht, die »reine Form« optimal wiederzugeben. Der Begriff der Idealisierung meint hier das Weglassen jeglicher Möblierung und die Interpolation von Bauwerksschäden. Die Idee ist, eine Ästhetik zu generieren, die eine unverfälschte Plastizität der Formen vermittelt. Dafür wurde eine monochrome Darstellung gewählt (Vgl. Abb. 17).

⁹⁰ Dodgson, Neil A.: Variation and extrema of human interpupillary distance. *Electronic Imaging* 2004. International Society for Optics and Photonics, 2004, S. 4 ff. Und: Dixon, Melissa W. et al. (2000): Eye height scaling of absolute size in immersive and nonimmersive displays. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance* 26.2, 2000, S. 582 ff.

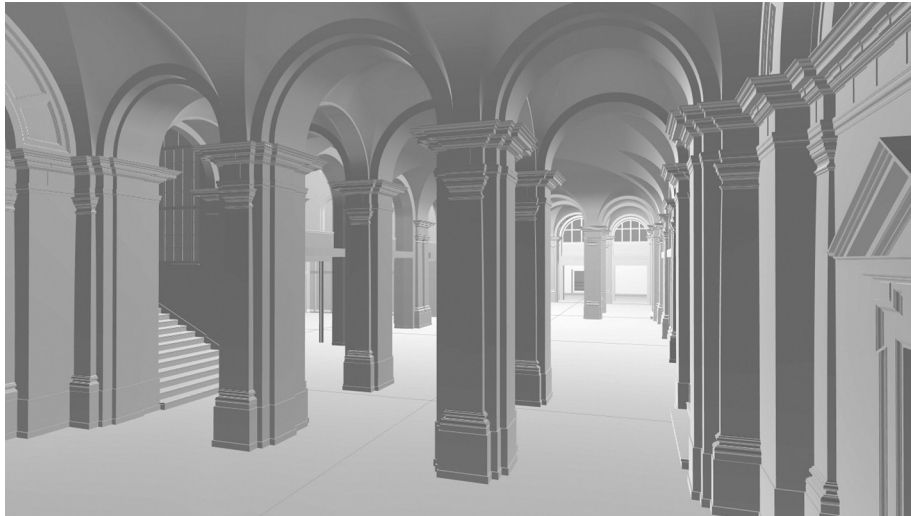


Abb. 17 Haupthalle in Unity

Qualitätsmerkmal einer monochromen Darstellung ist, ganz ähnlich wie bei der Schwarzweißfotografie, die *Zeichnung*. Die dafür notwendige, optimierte Kontrastdifferenzierung (\rightarrow *Texturgradient*) ließ sich durch das der Render-Engine zur Verfügung stehenden *Shader-Script* und die Beleuchtungssimulation kontrollieren. Der verwendete *Shader* wurde spezifisch für das Projekt für eine Latenz-freie Wiedergabe (75 Hz) programmiert. Eine Verbesserung der Abbildungsqualität des Modells hinsichtlich der Spezifika des Realraums kann durch eine verbesserte Belichtungssimulation und Weiterentwicklung von Shadern und Texturen ermöglicht werden. Mit der Verbesserung der verwendeten Hardware können hier höherer Leistungsanforderungen der Render-Engine umgesetzt werden.

4.2.5. Ablauf und Auswertung

Jeder Proband hatte während einer Explorationszeit von 15 Minuten die Aufgabe, fünf Perspektiven zu wählen und fotografisch festzuhalten, die seines Erachtens den Raum – im Hinblick auf architektonische Formensprache und Atmosphäre – bestmöglich wiedergeben. Im realen Raum fotografierten die Probanden die Perspektiven mit einer Fotokamera (24 mm Festbrennweite). In der VR wurde die jeweilige Auswahl durch Screen-Capturing festgehalten. Der zurückgelegte Weg wurde während der Exploration vom Experimentator auf Grundrissen skizziert. In der VR hatten die Probanden die Wahl zu stehen, sich hinzuhocken oder durch die Steuerung mit dem Controller zu »laufen« (Vgl. Abb. 18). Nach der Erfüllung der ersten Aufgabe wurden die Probanden außerhalb der realen beziehungsweise virtuellen Umgebung mit drei Grundrissvarianten, dem richtigen und drei manipulierten, konfrontiert und sollten die



Abb. 18 Versuchsaufbau an der Bauhausuniversität Weimar

richtige Variante wählen, ohne im Vorhinein über diese zweite Aufgabe in Kenntnis gesetzt worden zu sein.

Die Auswertung der Abbildungsähnlichkeit wurde vom Experimentator vorgenommen (Vgl. Abb. 19). Verglichen wurde (1) die Übereinstimmung des abgebildeten Bereichs sowie der Blick auf diesen Bereich, also Richtung beziehungsweise Winkel, von dem aus der Bereich betrachtet wurde, sowie die Höhe der Objekte im Sichtbereich; (2) die zurückgelegten Wege. Hierdurch konnten die Punkte, an denen Fotos beziehungsweise Bildschirmfotos gemacht wurden, rekonstruiert werden. Durch die Symmetrien im Gebäude stellen sich charakteristische Perspektiven zumeist an vier Stellen, mindestens aber an zwei Stellen auf gleiche Weise eintreten, wurden auch spiegelgleiche Blickwinkel als ähnlich gewertet. Bilder wurden als ähnlich gewertet, wenn die Blickrichtung ± 15 Grad horizontal/vertikal abwich und/oder die rekonstruierten Wege der Probanden eine klare Zuordnung der Bilder ermöglichten.

4.3. Ergebnisse

Bei der Exploration des Realraums durch *Gruppe I* (6 Teilnehmer: 3 ♀, 3 ♂, III.–VI. Studienjahr) fotografierte jeder Proband mindesten fünf und bis zu sieben Bilder. Wie erwartet, gab es innerhalb der Gruppe eine hohe Konkordanz an kanonischen Perspektiven: Die insgesamt 33 Bilder bildeten nur 13 Motive ab. Zwei Motive wurden von vier Probanden fotografiert, sechs Motive wurden von jeweils drei Probanden fotografiert. Zwei Motive wurden von zwei Probanden abgelichtet, und nur drei Motive waren Probanden-spezifisch.



Abb. 19 Exemplarische Bilder im Vergleich. Oben Perspektiven aus der VR, unten aus dem Realraum

In *Gruppe II* - virtuelle Exploratoren (6 Teilnehmer: 3 ♀, 3 ♂, III.–VI. Studienjahr) wurden insgesamt 35 Sichten festgehalten (pro Proband ebenfalls 5 bis 7 Bilder). Auch hier gab es nur zwölf Motive mit ebenfalls hoher Konkordanz: Ein Motiv wurde von fünf Probanden gewählt, ein anderes von vier Probanden, vier Sichten wurden von vier Probanden festgehalten, sechs Perspektiven wurden von je zwei Probanden gewählt, und nur zwei Ansichten waren Probandenspezifisch.

Diese Daten legen nahe, dass bestimmte Sichten im virtuellen und im realen Raum von den Architekturstudenten übereinstimmend als besonders relevant eingestuft wurden. Aber waren dies im virtuellen und im realen Raum die gleichen Perspektiven? Tatsächlich stimmte die Mehrheit der Befunde mit meiner Vorhersage überein: 12 der insgesamt 15 festgehaltenen Motive wurden sowohl im virtuellen wie im realen Raum gewählt. Das am häufigsten übereinstimmend fotografierte Motiv im realen Raum wurde auch dreimal mal in der VR festgehalten. Das zweitbeliebteste Motiv in der VR (4 x) war auch im realen Raum auf dem zweiten Rang (3 x). (Vgl. → *Anhang 2*)

Interessant ist allerdings auch die Betrachtung der Unterschiede. Obwohl die Analyse der zurückgelegten Pfade in beiden Gruppen ähnliches Explorationsverhalten zeigte (→ *Anhang 3 u. 4*), zogen die Treppen in der VR mehr Aufmerksamkeit auf sich (5 x) als bei den Probanden im realen Raum (2 x). Auf ebenfalls wenig Entsprechung stieß die Wahl der Probanden in der VR für eine Sicht aus dem Zentrum der Haupthalle in die Querachse, die 3 Probanden ikonisch fanden, jedoch im realen Raum kein Mal fotografiert wurden. Hingegen widmeten die Probanden des realen Raums den Seitenflügeln mehr

Aufmerksamkeit (2 Sichten insgesamt 6 x gewählt) als die Probanden in der VR (eine Sicht 0 x, die andere 1 x).

Beeindruckend war das korrekte Übertragen des explorierten Raums auf den Grundriss: Vier der virtuellen Exploratoren wählten die Variante C – richtige Repräsentation – und zwei Variante A – die am geringsten abweichende Variante. Fünf Exploratoren im realen Raum wählten ebenfalls Variante C und einer Variante A.

Bei der Exploration der virtuellen Umgebung zeigten alle Probanden zunächst eine kurze Phase der Orientierung (< 3 min), in der sie sich einen Überblick über den Raum von der Ausgangsposition verschaffen. Danach beschrieben alle Probanden die virtuelle Umgebung während oder nach dem Experiment als sehr plastisch. »Jetzt möchte man gerne anfassen«, kommentierte eine Teilnehmerin ihr Erlebnis. Alle Probanden konnten dabei beobachtet werden, wie sie erfolglos mit Händen nach Objekten in ihrem Sichtfeld tasteten. Die Aufgabe des Fotografierens wurde ohne Zögern angenommen. Aussagen wie »ich muss mich erst richtig hinstellen, damit das Foto gut wird«, sprechen für eine direkte Übertragung einer gewohnten Tätigkeit in die virtuelle Welt und für die Einbeziehung eines gestalterischen Anspruchs bei der Ausführung der Aufgabe. Die Beschränkungen auf den »natürlichen« Blick wurden beispielsweise mit »ran-zoomen wär' jetzt cool« oder »schade, dass ich grad nicht höher stehen kann« kommentiert. Von vier Teilnehmern wurde ohne Nachfrage der Zweck des Raumes als der einer Empfangshalle identifiziert. Der Katalog der Fragen, die den Probanden vor und nach der Exploration gestellt wurden, ist angehängt (→ *Anhang 5*).

Betrachtet man das Explorationsverhalten in der Überlagerung der Notationen, so wird der Raum, genauer: der unterschiedliche Affordanzcharakter einzelner Raumteile, auf geeignete Weise lesbar (*Vgl. Abb. 20*). Im virtuellen Modell war die Quergalerie offenbar weniger interessant zu erlaufen, als im Realraum. Dennoch wurden »Fotos« von der räumliche Situation, insbesondere des Übergangs zur Haupthalle gemacht. Für einen Blick vom oberen Treppenpodest wurden im virtuellen Modell die hinteren Treppen bestiegen. Die Lichthof-Einbauten wurden im virtuellen Modell ausgiebiger betrachtet.

4.4. Diskussion

Anhand des Experiments konnten Wirkung und Verständnis eines realen Raumes mit der Wirkung und dem Verständnis seiner virtuellen Repräsentation verglichen werden. Auch ohne statistische Auswertung, die aufgrund der kleinen Stichprobe nur bedingt relevant wäre, zeichnet sich eine Bestätigung der Hy-

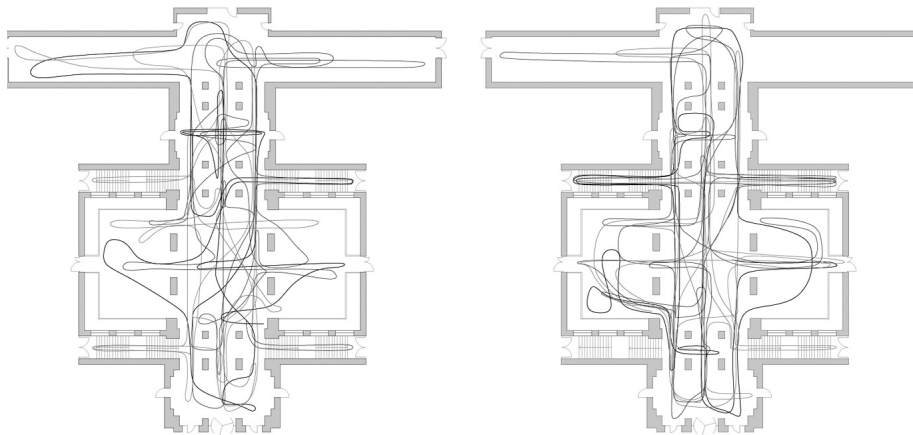


Abb. 20 Explorationsverhalten, links Realraum, rechts virtuelles Modell

pothese ab. Das virtuelle Modell, das mithilfe von Interfaces der VR exploriert wurde, stellt eine valide Repräsentation des Realraums dar. Es erlaubte den Probanden eine ebenso akkurate Übertragung auf den Grundriss wie den Probanden des realen Raums. Trotz Auslassung beispielsweise propriozeptiver und auditiver Simulationen legten die Probanden offensichtlich ein ausreichend genaues mentales Modell an – und das innerhalb von 15 Minuten.

Obwohl es naheliegend ist, dass Architekturstudenten besonders qualifiziert sind von Raumkonfigurationen auf Grundrisse zu schließen, müsste dies mit einer fachfremden Vergleichsgruppe bestätigt werden. Die Wahl von *Variante C* lässt sich – so vermute ich – damit erklären, dass sie die geringsten Abweichungen von *Variante A* beschreibt: Zwei Stützen sind verbunden, und die Proportionen der Quergalerie sind verändert. Sie ist im Grundriss verkürzt und verbreitert dargestellt. – Interessanterweise stellt sich der Effekt einer Fehlwahrnehmung der Quergalerie auch unabhängig des hier beschriebenen Experiments im Realraum ein. Ich vermute einen Zusammenhang mit der sehr gleichmäßig-intensiven, indirekten Belichtung und den gerundeten oberen Raumkanten. Ein ähnlicher Effekt lässt sich beispielsweise bei installativen Lichtkunst-Arbeiten James Turrells beobachten.⁹¹

Die Aufgabe, repräsentative Bilder zu machen, zeigte, dass beide Gruppen offenbar eine relativ klare und verbindende Vorstellungen haben, wie der Raum foto-grafisch festzuhalten ist. Anstatt 33 beziehungsweise 35 verschiedener

⁹¹ »In seinen begehbaren Rauminstallationen löst er [James Turrell] den Zusammenhang von optisch wahrnehmbaren Raumtiefen und der Erfahrung räumlicher Dimensionen auf und erzeugt den Eindruck, sich in einem grenzenlosen Umfeld aus reinem, farbigen Licht zu befinden.« Heffert, Heike: Raum Zeit Technikonstruktion. Aspekte der Wahrnehmung. In: Frieling, Rudolf und Dieter Daniels (Hrsg.): Medien Kunst Netz 1. Medienkunst im Überblick, Springer Wien/New York 2004, S. 178

Bilder wurden nur 13 beziehungsweise 15 Motive als besonders relevant festgehalten. Bei der Beobachtung der Exploratoren stellte sich der Eindruck ein, die Probanden würden bereits vorgefertigte Bilder im Kopf haben, während sie die dafür erforderlichen Aufnahmepositionen suchten.

Die – geringeren – Unterschiede der Motivwahl könnten verschiedene Gründe haben: Zum einen ist das Fotografieren privater und nicht identisch mit der Ansage, der Experimentator möge ein Bildschirmbild auslösen. Bei zukünftigen Experimenten ließe sich auch bei der virtuellen Exploration eine virtuelle Kamera einbinden, die für den Moment der Aufnahme das dreidimensionale Bild in ein zweidimensionales virtuelles Kamerabild zurückführt. Eine zusätzliche Integration der Fotofunktion in den Controller macht die Probanden unabhängig und enthemmt womöglich. Ebenfalls nicht ganz vergleichbar ist das Explorationsverhalten. Im Realraum ließe sich in Zukunft ein elektronisches Tracking-Verfahren realisieren, das dafür sorgt, dass sich die Probanden hier unbeobachtet fühlen.

Unterschiedliche Prioritäten in der Abbildungsauswahl könnten schließlich durch die verschiedenen Ausprägungen von Details der beiden Raumrealitäten (Oberflächen, Möblierungen, Licht etc.) und durch die unterschiedliche Vorerfahrung der Probanden mit den Räumen bedingt sein. Zusammenfassend hervorzuheben ist jedoch, wie relativ robust die Haupterfahrung beider Räume zu sein scheint und damit die übereinstimmende Motivauswahl und korrekte Identifikation des Grundrisses, trotz der Reduktion der Dimensionalität der Sinneindrücke in der VR.

5. Ausblick und Schlusswort

Das Experiment zeigt, dass ein mit den derzeit zur Verfügung stehenden Mitteln virtuell explorierter Raum durchaus eine valide Repräsentation von realem Raum darstellen kann. Sowohl bei den Zuordnungen des Grundrisses zum Erlebten als auch beim Explorationsverhalten der Probanden sind Übereinstimmungen zu beobachten, die darauf schließen lassen, dass der Raum auf ähnliche Weise wahrgenommen wurde. Der Vergleich der Fotos belegt, dass architektonische Formulierungen und Charakteristika in virtuell und real exploriertem Raum ähnlich verstanden werden können. Das kann als übereinstimmende Lesart von Architektur durch Prägung interpretiert werden, und ein Verweis auf objektiv wahrnehmbare Raumwirkungen sein. Inwiefern Korrelationen zwischen realem und virtuellen Raum auch beim Laien sichtbar wären, bleibt zu überprüfen. Die vorliegende Arbeit könnte als Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen dienen.

Für meine Annäherung an neue Werkzeuge des Entwerfens bedeuten die gewonnenen Erkenntnisse, dass VR auch für hypothetischen Raum ein geeignetes Werkzeug der Betrachtung und Überprüfung ist. Meine Hypothese, dass in IVEs Wahrnehmung besser in kreatives Denken – und kreatives Denken besser in konkrete Entwürfe umgesetzt werden kann, ist davon abhängig, wie intuitiv die Interpretation der Nutzervorstellung vollzogen wird. Die Freiheitsgrade im 3D-Modeling erreichen noch nicht diejenigen konventioneller Anwendungen. Abstrakte Darstellungsformen, die durch Unschärfe die »Erforschung des In-Existenten« unterstützen, gilt es auszuprobieren. Die Integration von Werkzeugen dreidimensionaler Interaktion digital generierter Objekte ist eine Aufgabe, die in Zusammenarbeit mit Interfacedesignern erfüllt werden muss.

Wenn man Entwürfe als komplexe Kommunikationsprozesse zu rekonstruieren versucht, dann eröffnet die VR – abgesehen von den selbstverständlich gewordenen digitalen Kommunikationsmedien – schon jetzt eine neue Dimension: Die Beobachtungen während des Experiments machen es auf erstaunliche Weise möglich, den Blick des anderen zu lesen. Ganz egal wie viel vom körperlosen »Auf-die-Welt-Blicken« durch den Nutzer als »In-der-Welt-sein« interpretiert wird, die Darstellungsform einer virtuellen Umgebung ist für einen außenstehenden Beobachter ein »symbolischer Spiegel« – ein Spiegel, der den Blick selbst abzubilden vermag.⁹² Auch darin liegt ein Potenzial dieser Technologie: nämlich im Verständnis des Anderen, seines Blicks auf (oder in) die Welt; und in der Einbeziehung dieses Verständnisses in die eigene Arbeit.

⁹² Der symbolische Spiegel wird von Hans Belting im Bezug auf die Versuche Filippo Brunelleschis zur Zentralperspektive eingeführt. Vgl.: Belting, Hans: Florenz und Bagdad. Eine westöstliche Geschichte des Blicks. CH Beck, München, 2008, S. 177 f.

5.1. Danksagung

Ich danke meinen Betreuern und langjährigen Hochschullehrern Christoph Gengnagel, Susanne Hauser und Norbert Palz für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit bei ihnen anzufertigen, und das Vertrauen, mich bei dieser Tour ins Ungewisse zu begleiten. Eine Horizonterweiterung waren auch die Gespräche mit Niklas Goldbach, Alexander Kulik und Constance Scharff, die mir unter anderem die Türen zu unbekanntem Disziplinen geöffnet haben. Mein besonderer Dank gilt zudem meinen Mitstreitern und Freunden Jörg Brinkmann und Marcel Karnapke, die mir in ihren Professionen als Mediendesigner, -informatiker und -künstler stets kritisch und aufopferungsvoll bei der Umsetzung meiner Überlegungen beiseite standen. Paul Dahlke und Alexander Hey möchte ich für ihren spontanen und selbstlosen Einsatz danken. Ich möchte daneben auch meine »Versuchskaninchen« und Helfer nicht unerwähnt lassen: Dank an Kommilitonen der *UdK Berlin*, *BTU Cottbus* und *BU Weimar*: Alex, Basti, Caro, Freya, Hikari, Katja, Kevin, Kim, Lara, Martin, Maxim, Sarah und Simon.

5. Verwendete Literatur, Abbildungen

BÜCHER

- Agamben, Giorgio und Davide Giuriato (Übers.): Das Offene. Der Mensch und das Tier. Suhrkamp Frankfurt am Main, 2003
- Ammon, Sabine und Eva Maria Froschauer (Hrsg.): Wissenschaft Entwerfen. Vom forschenden Entwerfen zur Entwurfsforschung der Architektur. Fink München, 2013
- Belting, Hans. Florenz und Bagdad. Eine westöstliche Geschichte des Blicks. CH Beck, München, 2008
- Bollé, Michael: Der Campus. Ein Architekturführer durch das Gelände der Hochschule der Künste und der Technischen Universität Berlin. Arenhövel Verlag Berlin, 1994
- Bowman, Doug A., et al.: 3D user interfaces. Theory and practice. Addison-Wesley, 2004
- Broderick, Damien: The Judas Mandala. Pocket Books, 1982
- Buser, Kurt: Kurzlehrbuch Medizinische Psychologie/Medizinische Soziologie. Urban&Fischer München/Jena, 2007
- Damásio, António: Descartes Error. Emotion, reason and the human brain. Random House, New York, 2008
- Dörner, Ralf, Wolfgang Broll, Paul Grimm und Bernhard Jung (Hrsg.): Virtual und Augmented Reality, Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität. Springer Berlin/Heidelberg, 2013
- Edgerton, Samuel Y.: Giotto und die Erfindung der dritten Dimension. Malerei und Geometrie am Vorabend der wissenschaftlichen Revolution. Fink, München, 2004
- Frieling, Rudolf und Dieter Daniels (Hrsg.): Medien Kunst Netz 1. Medienkunst im Überblick. Springer Wien/New York 2004
- Gethmann, Daniel und Susanne Hauser (Hrsg.): Kulturtechnik Entwerfen. Praktiken, Konzepte und Medien in Architektur und Design Science. [transcript] Bielefeld, 2009
- Gibson, James Jerome: The perception of the visual world. Houghton Mifflin Boston, 1950
- Gibson, William: Neuromancer. Ace New York, 1984
- Heim, Michael: The Metaphysics of Virtual Reality. Oxford University Press, 1993
- Krasny, Elke (Hrsg.): Architektur beginnt im Kopf. The making of architecture. Birkhäuser Basel, 2008
- Krauthausen, Karin und Omar W. Kasim (Hrsg.): Notieren – Skizzieren. Schreiben und Zeichnen als Verfahren des Entwurfs, 2010
- Laurel, Brenda: Computers as theatre. Addison-Wesley, 2013
- Lem, Stanisław und Herbert Hörz (Übers.): Summa technologiae. Insel, 1976
- Krueger, Myron: Artificial Reality 2. Addison-Wesley, 1991
- Kubovy, Michael: The psychology of perspective and Renaissance art. CUP Archive, 1988
- Leopold, Cornelia: Geometrische Grundlagen der Architekturdarstellung. Vierweg+Teubner Wiesbaden, 2013
- Mainzer, Klaus: Die Berechnung der Welt. Von der Weltformel zu Big Data. CH Beck, München, 2014

Mainzer, Klaus: Computernetze und virtuelle Realität: Leben in der Wissensgesellschaft. Springer Berlin/Heidelberg, 1999

McLuhan, Marshall: The Medium is the Message: An Inventory of Effects, Random House, 1967

Schmitz, Thomas H. und Hannah Groninger (Hrsg.): Werkzeug – Denkzeug. Manuelle Intelligenz und Transmedialität kreativer Prozesse. [transcript] Bielefeld, 2012

AUFSÄTZE & REDEN

Flusser, Vilém: Vom Unterworfenen zum Entwerfer von Gewohntem, in Intelligent Building, Universität Karlsruhe, 1989

von Foerster, Heinz: The Invented Reality. In: Watzlawick, Paul (Hrsg.): The Invented Reality. How do we know what we believe we know? Contributions to constructivism, Norton, 1988

Le Corbusier: An die Studenten. Chartre d'Athenes. Rowohlt Hamburg, 1962

Tellkamp, Uwe: Laudatio auf Mircea Cărtărescu, Leipziger Buchpreis, 15.03.2015

Vinge, Vernor und Ray Kurzweil: Technological Singularity. Department of Mathematical Sciences, San Diego State University, 1993

PAPERS & ARTIKEL

Arteaga, Alex: Auditive Architektur Einführung in eine neue Disziplin. Kunsttexte, 4/2010

Beck, Stephan, André Kunert, Alexander Kulik und Bernd Froehlich: Immersive group-to-group telepresence. Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions, 2013

Coomans, MiK D., und R. M. Oxman: Prototyping of Designs in Virtual Reality. Proceedings of the 3rd Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning Conference, 1996

Dixon, Melissa W. et al. (2000): Eye height scaling of absolute size in immersive and nonimmersive displays. Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance 26.2, 2000

Do, Ellen Yi-Luen: VR sketchpad. Computer Aided Architectural Design Futures 2001. Springer, 2001

Dobson, Adrian: Exploring conceptual design using CAD visualisation and virtual reality modelling. Computerised Craftmanship-16th Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe, eCAADe, Paris, 1998

Dodgson, Neil A.: Variation and extrema of human interpupillary distance. Electronic Imaging 2004. International Society for Optics and Photonics, 2004, S. 4 ff.

Donath, Dirk und Holger Regenbrecht: Der Bleistift im 21. Jahrhundert. Das architektonische Entwerfen in interaktiven VR-Umgebungen. Erfahrungen im Entwerfen von Raumsituationen mit einem immersiven Virtual-Reality-System. Proceedings Architektur im Informationszeitalter, Stuttgart, 1999

Dorta, Tomas, Edgar Perez und Annemarie Lesage: The ideation gap. Hybrid tools, design flow and practice. Design Studies 29.2, 2008

Goldin-Meadow, S. und Wagner, S. M.: How our hands help us learn. Trends in Cognitive Sciences 9, 2005

Goldschmidt, Gabriela: On Visual Design Thinking. The Vis Kids of Architecture. Design Studies 15, 1994

- Heath, C. und Luff, P.: Gesture and institutional interaction. Figuring bids in auctions of fine art and antiques, *Gesture*, 7(2), 2007, S. 215–240. Oder auch: Visser, W.: The cognitive artifacts of designing. Erlbaum Mahwah, 2006
- Heilmann, Till A.: Digitalität als Taktilität, *Zeitschrift für Medienwissenschaft* 3, Berlin 2010
- Interrante, Victoria et al. (2006): Distance perception in immersive virtual environments. *Virtual Reality Conference IEEE*, 2006
- Jacob, Robert JK: What you look at is what you get. Eye movement-based interaction techniques. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. ACM, 1990
- Lappe, Markus, Michael Jenkin und Laurence R. Harris: Travel distance estimation from visual motion by leaky path integration. *Experimental Brain Research* 180.1, 2007
- Lengyel, Dominik und Catherine Toulouse: 3D-Scans für die Rekontextualisierung antiker Skulptur. *Electronic Media and Visual Arts (EVA)*, Konferenzband, Berlin, 2014
- Okeil, Ahmad: Hybrid Design Environments. *Immersive and Non-Immersive Architectural Design, ITcon*, Vol. 15, 2010
- Proske, Uwe und Simon C. Gandevia: The kinaesthetic senses. *The Journal of physiology*, 587.17, 2009
- Schröder, Dirk et al. (2010): Virtual reality system at RWTH Aachen University. *Proceedings of the international symposium on room acoustics (ISRA)*, Melbourne Australia, 2010
- Steinicke, Frank et al. (2009): Transitional environments enhance distance perception in immersive virtual reality systems. *Proceedings of the 6th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*. ACM, 2009
- Suleiman, Wassim, Thierry Joliveau und Eric Favier: A New Algorithm for 3D Isovists, *Advances in Spatial Data Handling*, Springer Berlin/Heidelberg, 2013
- Steinicke, Frank, et al. (2010): Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on* 16.1, 2010
- Vishwanath, Dhanraj, Ahna R. Girshick und Martin S. Banks: Why pictures look right when viewed from the wrong place. *Nature neuroscience* 8.10, 2005
- Zoltán Füredi und D. J. Kleitman: The prison yard problem. In: *Combinatorica* 14, Nr. 3, 1994

ABBILDUNGEN

Titelbild: Niklas Goldbach/Verfasser

Abb. 1 u. 2: Donath Donath, Dirk und Holger Regenbrecht: Der Bleistift im 21. Jahrhundert. Das architektonische Entwerfen in interaktiven VR-Umgebungen

Abb. 3–6: Beck, Stephan, André Kunert, Alexander Kulik und Bernd Froehlich: Immersive group-to-group telepresence

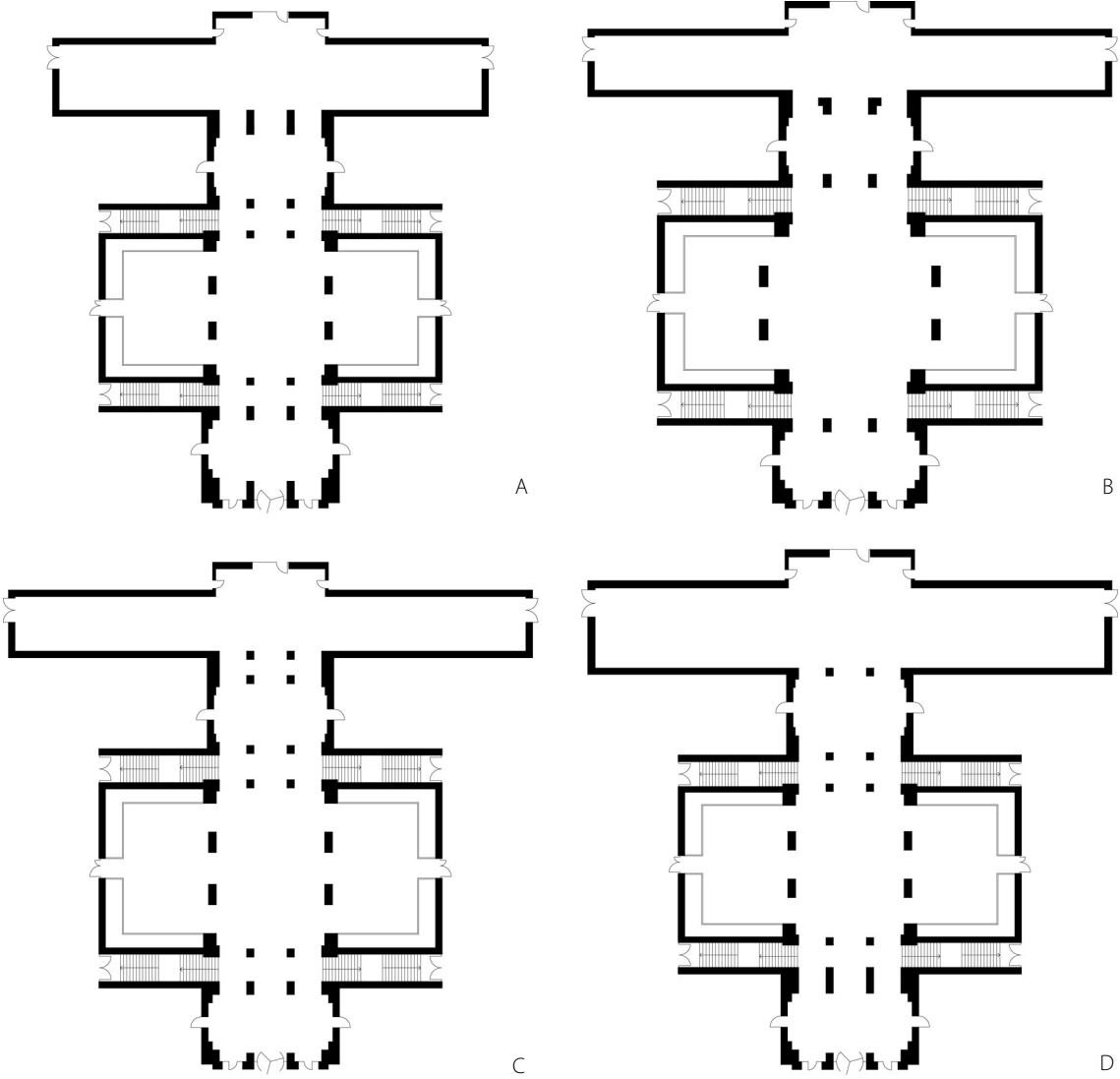
Abb. 7 u. 8: Leap Motion Inc., <http://www.leapmotion.com>

Abb. 9: Dörner, Ralf, Wolfgang Broll, Paul Grimm und Bernhard Jung (Hrsg.): *Virtual und Augmented Reality, Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*

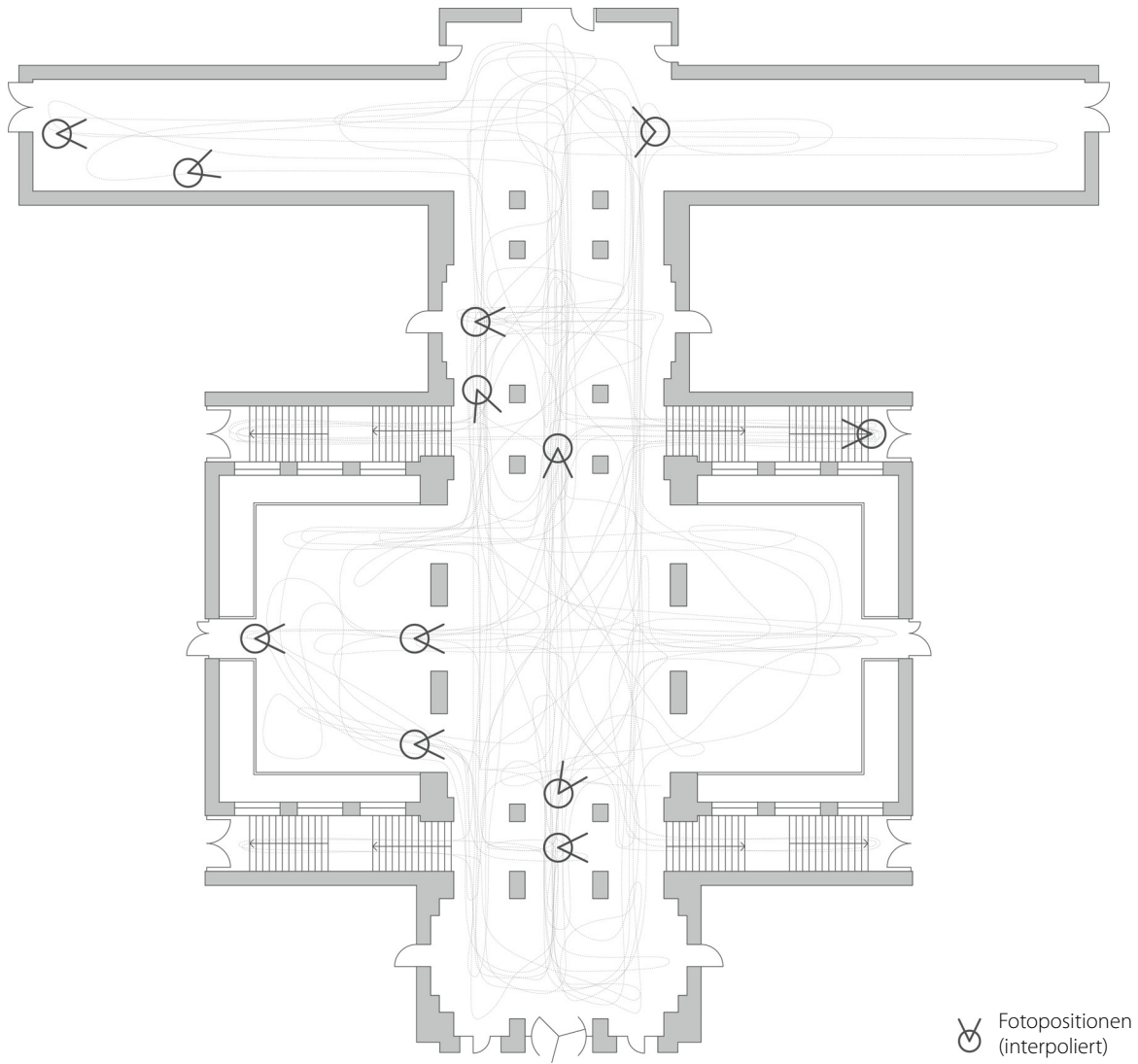
Abb. 10: *The New Yorker*, <http://www.newyorker.com>

Abb. 11–20, sowie Anhänge 1–4: Verfasser

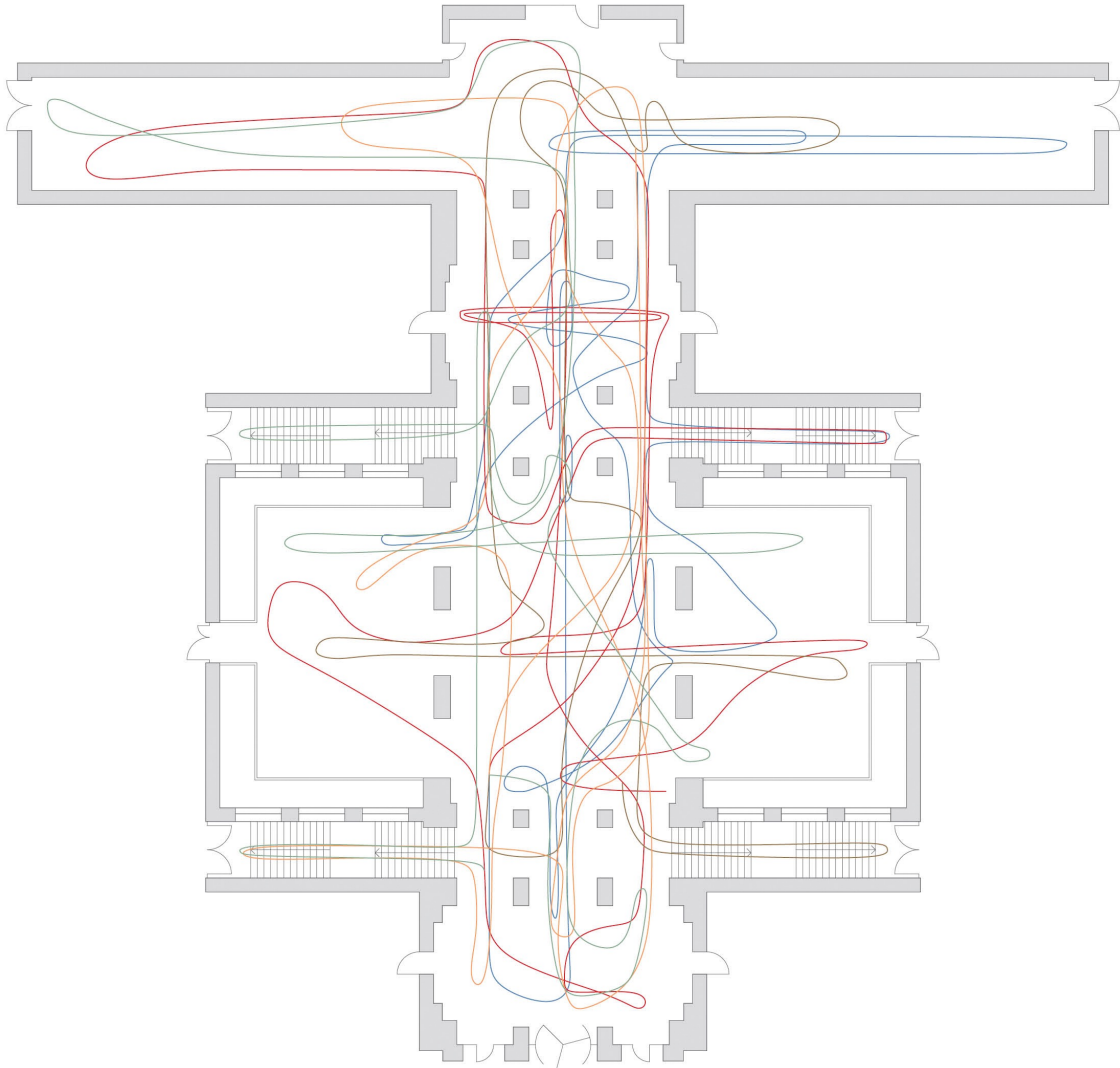
Anhang 1 – Grundrissvarianten



Anhang 2 – Fotopositionen

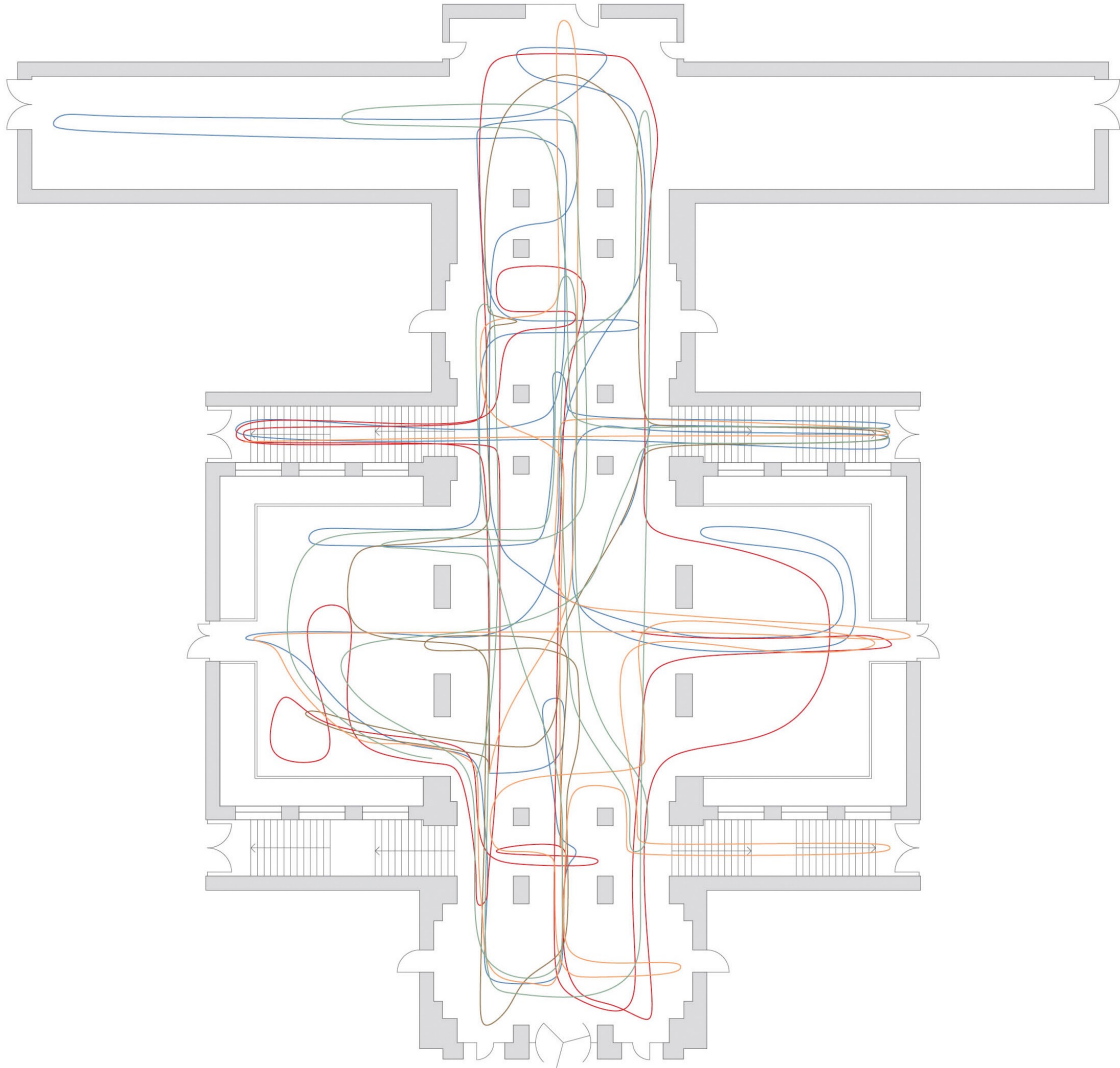


Anhang 3 – Explorationsverhalten real-räumliche Exploration



- PROBAND 1 ———
- PROBAND 2 ———
- PROBAND 3 ———
- PROBAND 4 ———
- PROBAND 5 ———
- PROBAND 6 ———

Anhang 4 – Explorationsverhalten virtuell-räumliche Exploration



- PROBAND 1 ———
- PROBAND 2 ———
- PROBAND 3 ———
- PROBAND 4 ———
- PROBAND 5 ———
- PROBAND 6 ———

Anhang 5 – Fragebogen

Proband _____ m/w

Alle Fragen und Aufgaben werden vom Experimentator mündlich gestellt.

Fragen vor Durchführung

Kennst du die Oculus Rift?

Hast du irgendwelche Erfahrungen mit Virtual Reality?

Spielst du Computerspiele?

Wie groß bist du?

Hast du eine Sehschwäche?

Aufgabe 1

Du hast 15 Minuten Zeit, dir den Raum in der VR in Ruhe anzuschauen. Die Aufgabe besteht darin, dir fünf Standorte bzw. Perspektiven zu suchen, die du fotografisch festhalten möchtest. Du kannst die Fotos dann direkt während deiner Erkundung machen. Du kannst aber auch am Ende zu den Punkten zurückkehren. Wenn du ein Bild machen möchtest, sagst du bitte Bescheid. Nach 10 Minuten gebe ich dir zu verstehen, dass du noch 5 Minuten Zeit hast.

Aufgabe 2

Bitte wähle den richtigen Grundriss aus! Nimm dir dabei soviel Zeit, wie du brauchst.

Fragen nach Durchführung

In welchem Studienjahr bist du derzeit?

Du studierst Architektur?

Kennst du das Gebäude der UdK in der Berliner Hardenbergstraße?

Hast du Anmerkungen?

Wie hast du den virtuellen Raum erlebt?