

Ändern des Benutzerbewegungsverhaltens in virtuellen Umgebungen

Adalberto L. Simeone, Genia Mavridou und Wendy Powell, *Senior Member, IEEE*

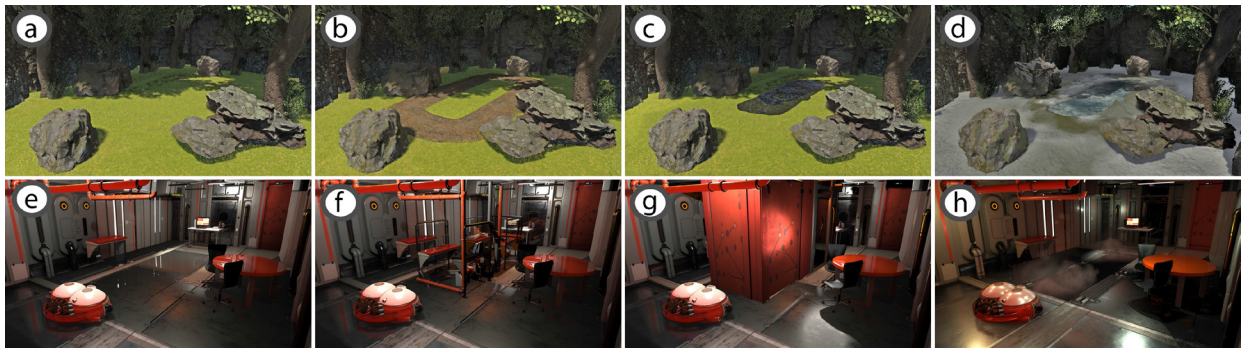


Abb. 1. Oben die beiden Sätze virtueller Umgebungen, die wir für die Studie entworfen haben. Diese Umgebungen basieren auf einer physischen Umgebung, in der jedes Objekt mit einem physischen Proxy gekoppelt ist. Die erste Zeile zeigt Änderungen der Darstellung des zentralen Bereichs durch verschiedene Oberflächen. In der zweiten Reihe werden verschiedene Arten von immateriellen Hindernissen im zentralen Bereich vorgestellt. Zusätzlich wurde eine virtuelle Replik der physischen Umgebung erstellt (siehe Abb. 2).

Abstrakt - In immersiven Virtual Reality-Systemen bewegen sich Benutzer in einer virtuellen Umgebung wie in einer analogen physischen Umgebung. In dieser Arbeit haben wir untersucht, wie sich das Benutzerverhalten auswirkt, wenn sich die virtuelle Umgebung vom physischen Raum unterscheidet. Wir haben zwei Sätze mit jeweils vier Umgebungen sowie eine virtuelle Replik der physischen Umgebung als Basis erstellt. Das erste konzentrierte sich auf ästhetische Diskrepanzen, wie eine Wasseroberfläche anstelle von festem Boden. Die zweite konzentrierte sich auf das Mischen von immateriellen Objekten mit solchen, die mit materiellen Objekten gepaart waren. Zum Beispiel einen Bereich mit Wänden oder Hindernissen sperren. Wir haben eine Studie entworfen, in der die Teilnehmer drei Wegpunkte erreichen mussten, die so angelegt waren, dass sie aufgrund des Konflikts zwischen den nicht übereinstimmenden visuellen Reizen und ihrem Bewusstsein für die tatsächliche Raumaufteilung entscheiden konnten, welchen Weg sie einschlagen sollten. Wir haben ihre Leistungen analysiert, um festzustellen, ob sich ihre Flugbahnen auf dem kürzesten Weg signifikant verändert haben. Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Teilnehmer ihre Flugbahn bei Oberflächen geändert haben, die eine höhere Gehschwierigkeit darstellen (z. B. Wasser anstelle von Gras). Als jedoch festgestellt wurde, dass das grafische Erscheinungsbild nicht eindeutig ist, gab es keine signifikante Änderung der Flugbahn. Die Umgebungen, in denen immaterielle Objekte mit physischen Objekten vermischt wurden, hatten den größten Einfluss auf die Flugbahnen mit einer mittleren Abweichung von der kürzesten Route von Wir haben ihre Leistungen analysiert, um festzustellen, ob sich ihre Flugbahnen auf dem kürzesten Weg signifikant verändert haben. Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Teilnehmer ihre Flugbahn bei Oberflächen geändert haben, die eine höhere Gehschwierigkeit darstellen (z. B. Wasser anstelle von Gras). Als jedoch festgestellt wurde, dass das grafische Erscheinungsbild nicht eindeutig ist, gab es keine signifikante Änderung der Flugbahn. Die Umgebungen, in denen immaterielle Objekte mit physischen Objekten vermischt wurden, hatten den größten Einfluss auf Flugbahnen mit einer mittleren Abweichung von der kürzesten Route von Wir haben ihre Leistungen analysiert, um festzustellen, ob sich ihre Flugbahnen auf dem kürzesten Weg signifikant verändert haben. Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Teilnehmer ihre Flugbahn bei Oberflächen geändert haben, die eine höhere Gehschwierigkeit darstellen (z. B. Wasser anstelle von Gras). Als jedoch festgestellt wurde, dass das grafische Erscheinungsbild nicht eindeutig ist, gab es keine signifikante Änderung der Flugbahn. Die Umgebungen, in denen immaterielle Objekte mit physischen Objekten vermischt wurden, hatten den größten Einfluss auf Flugbahnen mit einer mittleren Abweichung von der kürzesten Route von Es gab keine signifikante Änderung der Flugbahn. Die Umgebungen, in denen immaterielle Objekte mit physischen Objekten vermischt wurden, hatten den größten Einfluss auf die Flugbahnen mit einer mittleren Abweichung von der kürzesten Route von Es gab keine signifikante Änderung der Flugbahn. Die Umgebungen, in denen immaterielle Objekte mit physischen Objekten vermischt wurden, hatten den größten Einfluss auf die Flugbahnen mit einer mittleren Abweichung von der kürzesten Route von Es gab keine signifikante Änderung der Flugbahn.

Indexbegriffe -Virtuelle Realität; Fortbewegung; Benutzerverhalten

1 I. EINLEITUNG

Die Erkundung virtueller Umgebungen (VE) durch Gehen ist die realistischste und natürlichste Schnittstelle für VR-Systeme (Virtual Reality), in denen Benutzer anthropomorphe Charaktere verkörpern [43]. Es ist auch die technisch anspruchsvollste Schnittstelle aufgrund von Hardwareproblemen (Tracking-Systeme, zu tragende Instrumente) [4] und Umweltproblemen (Ungleichheit zwischen den Ausmaßen des VE und dem verfügbaren physischen Raum [22]; Vorhandensein von physikalischen Elementen, die in der Simulation nicht vorhanden sind [27]). Obwohl verschiedene Lösungen für diese Probleme vorgestellt wurden [22, 35, 42], sind diese nicht immer an häusliche Umgebungen wie Wohnungen, Büros und andere Orte anpassbar, die nicht explizit als VR-Labor konzipiert sind. Infolgedessen erfordern aktuelle Heim-VR-Anwendungen, dass Benutzer in begrenzten Bereichen sitzen oder sich bewegen müssen

Mildern Sie das Problem.

Wir sind der Meinung, dass die inländische VR ein grundlegendes Sprungbrett für ihre breite Akzeptanz darstellt. Diese Umgebungen bieten jedoch unterschiedliche andere Herausforderungen im Vergleich zu VR-Labors: in Häusern, Möbeln schränkt den navigierbaren Raum ein. Stattdessen sind VR-Labore normalerweise groß und leere Räume. Das Einbeziehen von Objekten aus der unmittelbaren physischen Umgebung des Benutzers in die Simulation durch Ersetzen durch nicht übereinstimmende virtuelle Gegenstände bietet das Potenzial, ein überzeugendes VR-Erlebnis zu bieten [27, 28]. Wenn sich frühere Arbeiten jedoch auf die Bewegung in übereinstimmenden Umgebungen [7] oder leeren Umgebungen [22] konzentrierten, wurde weniger darauf geachtet, ob sich eine Änderung der Nichtübereinstimmung zwischen der physischen Umgebung und ihrer virtuellen Darstellung auf das Bewegungsverhalten der Benutzer auswirkt. Wenn ja, gibt es bestimmte Änderungen, die wirksamer sind als andere?

• Adalberto L. Simeone ist an der Universität von Portsmouth. E-Mail: adalberto.simeone@port.ac.uk.

• I fi genia Mavridou ist an der Universität von Bournemouth. E-Mail: imavridou@bournemouth.ac.uk.

• Wendy Powell ist an der Universität von Portsmouth. E-Mail: wendy.powell@port.ac.uk.

Manuskript erhalten am 19. September 2016; akzeptiert 10. Jan. 2017.

Datum der Veröffentlichung 26. Januar 2017; Datum der aktuellen Version 18. März 2017.

Informationen zum Erhalt von Nachdrucken dieses Artikels erhalten Sie per E-Mail an:

reprints@ieee.org. Verweisen Sie unten auf die digitale Objektkennung. Digitale Objektkennung Nr.

10.1109 / TVCG.2017.2657038

In diesem Artikel haben wir zwei Arten von Änderungen an der Darstellung des VE untersucht: 1) *ästhetisch* Nichtübereinstimmung bei der Darstellung von Oberflächen; 2) Mischen von virtuellen Objekten, die mit einem physischen Proxy gekoppelt sind, zusammen mit *immateriell* diejenigen, die nicht sind. Wir haben 18 Teilnehmer gebeten, auf eine Folge von drei virtuellen Objekten zuzugehen, die mit physischen Objekten gepaart wurden. Wir haben vier Außen-VEs (mit unterschiedlichen Oberflächen) und vier Innen-VEs (mit immateriellen und physisch gesicherten virtuellen Objekten) entworfen, wobei eine zunehmende Nichtübereinstimmung mit dem physischen Raum (siehe Abb. 1) als Basis dient. Unser Ziel war es zu bewerten, wie diese beiden Faktoren das Bewegungsverhalten der Benutzer verändern können. Wir wissen, dass in der VR-Laufbahn die Flugbahnen tendenziell denen entsprechen, die durch natürliche Fortbewegung ausgeführt werden [4].

Daher haben wir drei Wegpunkte so platziert, dass der kürzeste und direkteste Weg, der sie verbindet, durch einen Bereich führte, der die Wahl zwischen dem Festhalten an den visuellen Reizen und dem Einnehmen eines längeren Weges oder dem Ignorieren zugunsten ihrer Wahrnehmung des physischen Raum. In einem der Außen-VEs wurde dieser Bereich beispielsweise als Wasserteich dargestellt, während er in einem der Innen-VEs von Mauern umgeben war. Dies ermöglicht es uns zu verstehen, wie ihr Verhalten beeinflusst wird und wie es beeinflusst werden kann.

Die Möglichkeit, das Bewegungsverhalten des Benutzers zu beeinflussen, kann mehrere nützliche Anwendungen haben. Zum Beispiel könnten VR-Kameramänner die Chancen von Benutzern maximieren, sich durch bestimmte Bereiche zu bewegen, um die Aktion nicht zu verpassen. In der häuslichen VR möchten wir möglicherweise vermeiden, in der Nähe von zerbrechlichen Gegenständen oder in der Nähe unseres schlafenden Haustieres zu gehen. Wenn Änderungen am ästhetischen Design ausreichen, um Benutzer auf subtile Weise zu einem bestimmten Weg zu ermutigen oder sie umgekehrt davon abzuhalten, einen anderen einzuschlagen, können wir die Auswirkungen solcher Situationen auf eine Weise minimieren, die die Glaubwürdigkeit der Erfahrung nicht beeinträchtigt [21]. Analog dazu ist es wichtig zu verstehen, wie das Bewegungsverhalten durch Platzieren immaterieller Objekte geändert werden kann, um VEs darzustellen, deren Ausmaß sich im Vergleich zur physischen Umgebung erheblich unterscheidet. Zum Beispiel ein virtueller Flur und ein reales Wohnzimmer.

Unsere Ergebnisse zeigen, dass sowohl das ästhetische Erscheinungsbild von Oberflächen als auch immaterielle virtuelle Objekte die Flugbahnen der Benutzer beeinflussen. Wir fanden heraus, dass Oberflächen unterschiedliche Verhaltensweisen hervorrufen, die sich aus realen Erfahrungen ergeben, abhängig von den nachteiligen Konsequenzen, die Benutzer beim Überfahren erwarten. Wenn Benutzer die visuellen Reize jedoch nicht wie beabsichtigt interpretieren können, verliert eine Änderung des Erscheinungsbilds einer Oberfläche ihre Wirksamkeit. Immaterielle Objekte beeinflussten stattdessen eher die Flugbahnen der Benutzer, wenn sie vom kürzesten Weg abwichen. Immaterielle Objekte halfen den Teilnehmern, ihre Interaktionen dort zu konzentrieren, wo sich die greifbaren befanden. Die Teilnehmer berichteten auch, dass die Kombination von immateriellen und materiellen Objekten die Illusion verstärkte, dass sie alle wirklich greifbar sein könnten.

2 R. BEGEISTERT W. ORK

Fortbewegung ist ein wesentlicher Bestandteil der VR. In vielen immersiven Anwendungsszenarien müssen Benutzer in der Lage sein, ihre Position und ihren Standpunkt zu ändern. Dies wird durch „Fortbewegungsschnittstellen“ erreicht, dh eine Interaktionstechnik, die über ein zugrunde liegendes System Benutzereingaben auf Bewegungen in der VE abbilden kann. Aufgrund des breiten Spektrums an 3D-Anwendungen können diese Schnittstellen durch die Genauigkeit unterschieden werden, mit der sie den Vorgang des Gehens simulieren. Im Folgenden beschreiben wir die wichtigsten Bewegungsschnittstellen und Studien, die das Bewegungsverhalten untersuchten.

2.1 Natürliches Gehen

High-Fidelity-Techniken sind diejenigen, die den Vorgang des Gehens am genauesten reproduzieren. Insbesondere in solchen Szenarien, in denen Benutzer von einem virtuellen Charakter verkörpert werden, ist es die natürlichste Wahl, wirklich in einem physischen Raum zu gehen. Natürliches Gehen bezieht sich normalerweise auf Szenarien, in denen das VE vollständig in dem physischen Raum enthalten ist, in dem das VR-System eingesetzt wird. Unter diesen Umständen entspricht ein Schritt in der realen Welt einem Schritt gleicher Länge in der VE. Es wurde festgestellt, dass diese Fortbewegungsschnittstelle im Vergleich zu Fortbewegungstechniken mit geringerer Feinheit wie Walking-in-Place [42] oder virtuelles Fliegen [2] ein Faktor ist, der die Präsenz verbessert [43]. Es wurde auch festgestellt, dass natürliches Gehen zu weniger Kollisionen mit Hindernissen führt [24], weniger Trainingszeit erfordert [25] und sich besser an reale Flugbahnen [46] oder Verhaltensweisen [41] anpasst.

2.2 Umgeleitetes Gehen

In solchen Szenarien, in denen Benutzer VEs untersuchen müssen, die größer als der verfügbare physische Raum sind, sind natürliche Gehschnittstellen weniger geeignet. „Umgeleitetes Gehen“ bezieht sich auf eine Kategorie von Techniken, mit denen Benutzer virtuelle Räume, die größer als ihre physische Umgebung sind, physisch erkunden können, indem sie die Wahrnehmung des physischen Pfads in der realen Welt in der VE ändern [22].

Suma et al. Präsentierten eine Taxonomie von Umleitungstechniken [40] und erweiterten frühere Arbeiten von Steinicke et al. [39]. Die Autoren klassifizieren diese

Techniken, je nachdem, ob sie die Translation oder Rotation beeinflussen, im Ausmaß der Veränderung (diskret oder kontinuierlich) und ob subtil oder offen. Beispiele für subtile Techniken, die die Menge beeinflussen

Der von den Benutzern zurückgelegte Raum sind die "Seven Leagues Boots" (Fortsetzung) ously) [14] und eine Technik von Bruder et al. das gleicht die Entfernung aus Wahrnehmung durch Selbstbewegungssillusionen (diskret) [3]. Offene kontinuierliche Techniken koppeln den Translationswechsel mit Navigationsvermittlern wie Fahrzeugen oder Aufzügen [11]. Diskrete Techniken verwenden bekannte Science-Fiction-Metaphern von Portalen, um zwischen verschiedenen Teilen einer Umgebung zu navigieren [8, 36].

Neuorientierungstechniken beeinflussen den Standpunkt des Benutzers in der Welt. Subtile Techniken umfassen die Arbeit von Razzaque et al. [22] zum umgeleiteten Gehen, bei dem die Kopfdrehungen kontinuierlich unbemerkt zunehmen, sodass Benutzer größere als physische Räume erkunden können. Es wurde gezeigt, dass diese Veränderungen innerhalb von Schwellenwerten tolerierbar sind [37, 38]. Ein Nachteil ist jedoch das Erfordernis eines großen räumlichen Radius, um nicht wahrgenommen zu werden. Es wurde berichtet, dass dieser Radius mindestens 22 m [12] bis mehr als 40 m [37] beträgt. Steinicke et al. Wenden umgeleitete Lauftechniken an, um Benutzer auf einem anderen virtuellen Pfad als dem, den sie in der physischen Welt gingen, zu einem virtuellen Objekt zu führen, das mit einem physischen Proxy übereinstimmt [39]. Dieser Ansatz wurde mit einem einzelnen Proxy-Objekt getestet, wie bei einer höheren Anzahl von Proxy-Requisiten. Die Reformationseffekte machen sich allmählich bemerkbar. Dies macht diese Techniken für kleinere häusliche Umgebungen ungeeignet. Diskrete Techniken ordnen stattdessen die Position einiger architektonischer Merkmale wie Türen neu. Diese Strategie ist jedoch nicht für nicht abstrakte Umgebungen geeignet, in denen die Aufrechterhaltung einer kohärenten räumlichen Beziehung von entscheidender Bedeutung ist. Offene kontinuierliche Techniken erfordern ausdrücklich, dass sich Benutzer neu orientieren, wenn sie die Grenzen der Umgebung erreichen [48]. Ablenkungselemente, Objekte oder Charaktere, die versuchen, die Aufmerksamkeit des Benutzers auf sich zu ziehen, indem sie ihn zwingen, den Kopf zu drehen, bieten die Möglichkeit, diese Gewinne einzuführen, während sich der Benutzer dem Reiz zuwendet [21]. Kohli et al. verwendeten eine Drehung des VE, um ein virtuelles Objekt an einem passenden physischen Proxy auszurichten, während der Benutzer durch die Bewegungen eines Droiden abgelenkt wird [15]. Diskrete Techniken erfordern stattdessen explizit, dass Benutzer ihre Überschrift ändern, während die Tracking-Updates eingefroren werden [48]. Neth et al. [19] untersuchten den Effekt einer dynamischen Änderung der Verstärkung im Gegensatz zu einem statischen Regler auf die durchschnittliche zurückgelegte Strecke, bevor sie neu ausgerichtet werden mussten. Die Autoren stellten fest, dass dynamische Regler zu einer deutlich größeren Gehstrecke führten. Sie untersuchten auch die Wirkung von kontextbezogenen Avatar-Agenten im Gegensatz zu unnatürlichen „Stoppschildern“, von denen festgestellt wurde, dass sie die Ergebnisse nicht wesentlich beeinflussen. [19] untersuchten den Effekt einer dynamischen Änderung der Verstärkung im Gegensatz zu einem statischen Regler auf die durchschnittliche zurückgelegte Strecke, bevor sie neu ausgerichtet werden mussten. Die Autoren stellten fest, dass dynamische Regler zu einer deutlich größeren Gehstrecke führten. Sie untersuchten auch die Wirkung von kontextbezogenen Avatar-Agenten im Gegensatz zu unnatürlichen „Stoppschildern“, von denen festgestellt wurde, dass sie die Ergebnisse nicht wesentlich beeinflussen. [19] untersuchten den Effekt einer dynamischen Änderung der Verstärkung im Gegensatz zu einem statischen Regler auf die durchschnittliche zurückgelegte Strecke, bevor sie neu ausgerichtet werden mussten. Die Autoren stellten fest, dass dynamische Regler zu einer deutlich größeren Gehstrecke führten. Sie untersuchten auch die Wirkung von kontextbezogenen Avatar-Agenten im Gegensatz zu unnatürlichen „Stoppschildern“, von denen festgestellt wurde, dass sie die Ergebnisse nicht wesentlich beeinflussen.

2.3 Begebar

Walking-in-Place (WIP) ist eine Kategorie von Techniken, bei denen, wie der Name schon sagt, der stationäre Gang des Benutzers auf die Bewegung im VE abgebildet wird [33, 42]. Eine umgeleitete Version von WIP verhindert, dass Benutzer in einem dreiseitigen CAVE-Setup auf die fehlende Rückwand blicken [23]. WIP wird normalerweise über Sensoren oder Infrarotmarkierungen implementiert, wurde aber auch auf einem Wii Balance Board [47] und durch Erkennen von Fußschatten auf dem Boden [51] demonstriert. Es wurde berichtet, dass WIP weniger realistisch ist als natürliches Gehen und zu Problemen im Zusammenhang mit Latenz und mangelnder Glätte während der Bewegung führt [6].

2.4 Abstrahierte Gehschnittstellen

„Virtuelles Fliegen“ gehört zu den am häufigsten verwendeten Techniken, bei denen die Manipulation des Blickwinkels über ein Eingabegerät wie einen Joystick oder eine Maus- und Tastaturschnittstelle erfolgt [2]. Eine weitere Variante dieses Konzepts, der „Human Joystick“, ist eine von McMahan et al. zur Verwendung in CAVE-Systemen, in denen die Position des Benutzers in Bezug auf die Mitte als Bewegungsvektor verwendet wird [18].

2.5 Laufbänder

Omnidirektionale Laufbänder unterstützen das Gehen in jede Richtung [35]. Während sie den virtuellen schiffbaren Raum verbessern und eine bessere Simulation des Gehvorgangs ermöglichen, würde ihre Größe radikale Umgestaltungen der häuslichen Umgebungen erfordern, in denen diese verwendet werden sollen. Laufbänder simulieren auch kein unebenes Gelände oder Hindernisse.

2.6 Fortbewegungsverhalten

Anders als in den zuvor zitierten Arbeiten untersuchen wir in diesem Artikel Faktoren, die das Verhalten der Benutzer beim Gehen in einem VE beeinflussen. Andere Forscher haben das Fortbewegungsverhalten untersucht, indem sie trajektografische Messungen und kinematische Daten analysiert haben. Cirio et al. [4] präsentierten einen Rahmen von Trajektorienkriterien, der den Realismus von virtuellen mit realen Trajektorien vergleicht. Das Framework enthält neun Metriken, die sich auf Form, Leistung und kinematische Merkmale beziehen.

Bei nicht eingeschränkten zielgerichteten Aufgaben entsprechen die Trajektorien in VE denen in einer realen Version der Aufgabe [4]. Fink et al. [7] stellten fest, dass sich die Trajektorien zur Vermeidung von Hindernissen zwischen einem VE und einer angepassten realen Umgebung nur geringfügig unterscheiden. Warren und Fajen haben ein Modell für die Lenkdynamik vorgeschlagen, das versucht darzustellen, wie Personen eine Umgebung in Richtung eines Ziels navigieren und dabei stationäre oder sich bewegende Hindernisse vermeiden [45]. Obwohl dieses Modell unter kontrollierten Bedingungen genau ist, reicht es nicht aus, um das Verhalten der Menschenmenge darzustellen [1]. Ruddle et al. [24] stellten fest, dass natürliches Gehen die Benutzer dazu veranlasste, um Hindernisse herumzugehen, wohingegen Schnittstellen mit geringerer Feinheit häufiger von Hindernissen durchdrungen wurden. Sanz et al. [26] haben Flugbahnen zur Vermeidung von Hindernissen in einer 10 m langen immersiven Projektionsumgebung verglichen, in der die Teilnehmer reale physische Hindernisse und Personen vermeiden mussten, und virtuelle (nicht vorhandene) Gegenstände gefunden. Ihre Ergebnisse zeigen, dass die Teilnehmer beim Umgang mit virtuellen Hindernissen tendenziell einen größeren Abstand (ca. 5 cm mehr) als bei physischen Hindernissen verwendeten.

Fajen hat die Rolle der Wahrnehmung von Erschwinglichkeit in VEs überprüft und darauf hingewiesen, dass Benutzer ihre Körpergröße und ihre Handlungsfähigkeit berücksichtigen, wenn sie entscheiden, welchen Weg sie einschlagen möchten [5]. Zum Beispiel bei der Entscheidung, wie man sich bewegt, um einem Hindernis auszuweichen. Passive Haptik kann auch die Flugbahn der Teilnehmer beeinflussen. Im „Pit Room“ [13] gab ein erhöhter Felsvorsprung den Teilnehmern die Illusion, neben einer Grube zu stehen. Folglich folgten ihre Flugbahnen dem Felsvorsprung. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit lag auf der Untersuchung, ob die Illusion überzeugend war. In unserer Arbeit sind wir daran interessiert, das Verhalten von Benutzern zu verstehen, wenn sie gezwungen sind, eine Navigationsentscheidung zu treffen, die auf dem Konflikt zwischen den visuellen Reizen des VE und ihrem Wissen über den realen Raum basiert, in dem sie sich befinden.

3 U. SER S. TUDY

Ziel der Studie war es zu untersuchen, wie sich verschiedene Arten von Änderungen beim Entwurf eines VE auf das Bewegungsverhalten auswirken. Wir haben zwei große Änderungskategorien betrachtet: die *ästhetische* Design der Umweltoberfläche (untersucht in einem Satz von vier Outdoor-VEs) und die Auswirkungen von *immateriell* Objekte, die mit physisch gepaarten virtuellen Objekten gemischt sind (untersucht in einem Satz von vier Innen-VEs). Jedes der einzelnen VEs weist eine Art von Änderung auf (im Folgenden detailliert beschrieben), von der wir glaubten, dass sie auf eine Reihe ähnlicher Szenarien verallgemeinerbar ist. In einem realen Szenario könnte ein VE-Designer möglicherweise mehrere Arten von Änderungen zusammen verwenden. Wir haben sie unabhängig voneinander untersucht, um ihre individuellen Auswirkungen auf das Bewegungsverhalten der Benutzer zu analysieren.

3.1 Aufgabe

Die Aufgabe bestand darin, dass die Teilnehmer einen Weg gegen den Uhrzeigersinn zwischen drei bestimmten Orten in dem Raum, in dem die Studie stattfand, einschlagen mussten. Diese Orte oder Wegpunkte wurden so angeordnet, dass einer der Abschnitte der kürzesten Route direkt über den zentralen Bereich führte. An jedem Wegpunkt platzierten wir ein echtes Möbelstück (einen Tisch, ein Regal und einen Schreibtisch). Die Teilnehmer mussten in jeder Umgebung drei Runden fahren. Bei Erreichen jedes Wegpunkts wiesen wir die Teilnehmer an, das Objekt zu berühren, das sie gesehen haben (das tatsächliche Möbelstück in den Bedingungen für echte Wörter / Nachbildungen oder das Ersatzobjekt, das sie in VR wahrgenommen haben), bevor wir mit dem nächsten fortfahren. Dies sollte Interaktionen in der Region simulieren. Als wir den letzten Wegpunkt erreicht hatten, sagten wir ihnen, sie sollten zum ersten zurückkehren und das Objekt erneut berühren.

Fig. 2 zeigt den dreieckigsten kürzesten Weg zwischen den drei Stellen. Wir haben die Teilnehmer gebeten, zum ersten Wegpunkt (der Tabelle) zurückzukehren, um sie zu zwingen, sich mit den experimentellen Bedingungen auseinanderzusetzen. Jedes VE wurde so verändert, dass die realistischste Route den zentralen Bereich vermieden hätte und somit von der kürzesten direkten Route abweicht. Die Teilnehmer starteten wie wir die erste Runde von der Couch (Wegpunkt 0)

beschlossen, nicht vor jeder neuen Umgebung eine neue Schulungsphase durchzuführen. Nach Pilottests haben wir festgestellt, dass die zuvor zurückgelegte Strecke Erreichen des ursprünglichen Wegpunkts, um den Teilnehmern zu helfen, sich zu orientieren, bevor sie tatsächlich mit der Aufgabe beginnen. Darüber hinaus, wie in der erläuterten *Analyse* In diesem Abschnitt werden die Trajektographiedaten nur zwischen den Punkten gesammelt, die sich dem ursprünglichen Wegpunkt am nächsten nähern, wodurch weitere Bewegungen herausgefiltert werden.

3.2 Design und Begründung virtueller Umgebungen

Das Design der einzelnen VEs entspricht dem Ziel der Studie, zu ermitteln, welche Änderungstypen den größten Einfluss auf das Bewegungsverhalten der Benutzer hatten. Das Prinzip hinter dem Design jedes VE bestand darin, eine "Basis"-Umgebung auszuwählen und "veränderte" Umgebungen zu schaffen, indem der zentrale Bereich (oder seine unmittelbare Umgebung) geändert wurde, während alles andere unverändert blieb. Dieser zentrale Bereich war 3,5 m lang und 1 m breit. Zwischen dem Umfang des zentralen Bereichs und den Objekten bestand ein Abstand von 1 m. An dem physischen Ort, an dem die Studie durchgeführt wurde, war dieser Bereich frei von Hindernissen. Wir haben keine visuellen Indikatoren wie Markierungen oder „Gates“ [4] in das Design von VE aufgenommen, da wir dachten, sie könnten das Verhalten der Benutzer beeinflussen. Wir haben dann Beispiele für Änderungen innerhalb der beiden Kategorien identifiziert: Dies könnte sich möglicherweise auf die Flugbahnen der Benutzer auswirken. Zusätzlich haben wir eine Nachbildung des Raums entworfen, in dem wir das Experiment durchgeführt haben, um einen Grundzustand darzustellen (siehe Abb. 2). Alle Umgebungen wurden mit Umgebungsgeräuschen entsprechend den einzigartigen Eigenschaften jedes VE angereichert.

Die erste Änderungskategorie konzentrierte sich auf die *ästhetisch* Nichtübereinstimmung zwischen der realen und der virtuellen Oberfläche. Wir haben ein Outdoor-Thema für die vier verwandten Umgebungen ausgewählt, da es im Freien nicht ungewöhnlich ist, unterschiedliche Oberflächen in einem begrenzten Bereich zu finden. Wir haben eine Basislinie im Freien erstellt *Substitutionsumfeld* [27] bestehend aus einer Rasenfläche. Die Wände des Raumes und die Möbel wurden durch Bäume und Felsen ähnlicher Größe ersetzt (siehe Abb. 1 (*ein*)). Die drei Änderungen, die wir entweder direkt an der im zentralen Bereich oder an den Außengrenzen verwendeten Oberfläche vorgenommen haben, sind repräsentativ für unterschiedliche Gehkomfortniveaus. Das

Pfad VE (*b*) veränderte die Grundumgebung, indem eine Route um das zentrale Gebiet vorgeschlagen wurde, die an Naturpfade erinnert. Das *Wasser* VE (*c*) ersetzte den zentralen Bereich durch einen flachen Teich. Im wirklichen Leben darüber zu gehen, würde als mögliche Unannehmlichkeit angesehen, wenn dies nicht ausdrücklich notwendig wäre. Wir haben das *Wasser* VE angepasst M_Water_Translucent Material aus dem *Partikeleffekte* Paket und verlangsamte die Geschwindigkeit der Wellen. Endlich, das *Eis* VE (*d*) ersetzt den zentralen Bereich durch eine eisige Oberfläche und den Rest durch kontextbezogenes angemessenes eisiges Gras. Wenn Sie im wirklichen Leben über Eis gehen, besteht die Gefahr eines Ausrutschens. Wir haben das benutzt M_Cave_Ice Material aus dem *Partikeleffekte* Paket.

Die zweite Änderungskategorie konzentrierte sich auf das Vorhandensein verschiedener Arten von *immateriell* Hindernisse, die mit virtuellen Objekten koexistieren, die mit physischen Proxys gepaart sind. Das Konzept, das die Wahl der spezifischen Änderungen beeinflusste, bestand darin, die Schwierigkeit, jene Hindernisse zu überwinden, von denen angenommen wird, dass sie die Flugbahnen der Benutzer beeinflussen könnten, allmählich zu erhöhen. Wir haben für diese VEs ein Indoor-Thema gewählt, da wir der Meinung sind, dass Hindernisse in einer solchen Umgebung angemessener wären. Wir haben eine Substitutionsumgebung geschaffen, die aus einem offenen Raum besteht, in dem die Wände, Böden und Möbel durch ähnliche Objekte aus den verfügbaren Innenräumen ersetzt wurden (siehe Abb. 1 (j) *e*), die Basislinie Indoor VE). Das *Objekte* VE (*f*) Die Grundlinie wurde geändert, indem immaterielle Objekte im zentralen Bereich platziert wurden. Während der Zugriff über den kürzesten Weg blockiert wird, können Benutzer dennoch die Lücken zwischen Objekten passieren. Das *Wände* VE (*g*) stattdessen den zentralen Bereich vollständig von Mauern umgeben. Wir haben eine weitere hinzugefügt *dunkel* VE (*h*) wo die Immaterialität eher subtraktiv als additiv war. Wir haben die Beleuchtung der Umgebung verändert und die für den Boden verwendeten Maschen entsprechend dem zentralen Bereich entfernt. Es schien also völlig dunkel zu sein, mit Dampf aus dem Boden.

Wir wollten verstehen, wie und warum sich die Teilnehmer für den von ihnen gewählten Weg entschieden haben. Wir wissen, dass Benutzer dazu neigen, Teile des VE zu meiden, die sie als Hindernisse wahrnehmen, wie Studien zur Vermeidung von Hindernissen belegen [7]. Es gibt jedoch nur wenige Informationen darüber, wie effektiv jeder Änderungstyp die Benutzertrajektorien beeinflusst. Wenn einige Teilnehmer beschlossen, über den Wasserteich oder durch eine Mauer zu gehen, haben wir versucht, den Grund für diese Entscheidung zu verstehen. Analog wollten wir

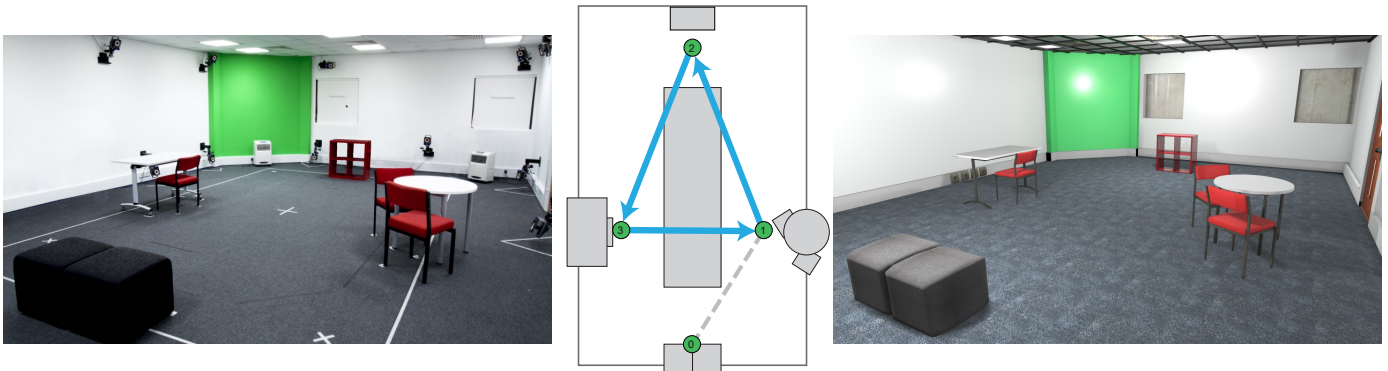


Abb. 2. Links ein Bild des VR-Labors. In der Mitte zeigt die Abbildung die Raumaufteilung. Der schwarze Rand repräsentiert den zuverlässigen Erfassungsbereich. Einige Gegenstände wurden nach außen gedrückt, um in Umgebungen, in denen der zentrale Bereich (grau) blockiert zu sein schien, genügend Platz zum bequemen Gehen zu schaffen. Der blaue Pfad repräsentiert den kürzesten Abstand zwischen Wegpunkten. Rechts die virtuelle Nachbildung des Raumes.

Verstehen Sie, warum andere stattdessen beschlossen, einen Umweg zu machen, um ein nicht vorhandenes Hindernis zu vermeiden. Mit diesem Wissen werden wir verstehen, wie das Benutzerverhalten in VEs beeinflusst werden kann. Die Beobachtung von Aktionen, die in der Realität nicht genau auf die gleiche Weise gespiegelt werden (z. B. keine physische Kollision beim Gehen durch eine Wand in VR), gibt uns Einblicke, wie wir diese Fehlausrichtung überzeugender machen können.

3.3 Teilnehmer

18 Teilnehmer (10 Männer, 8 Frauen) im Alter von 20-45 Jahren ($M = 30.06$, $SD = 7.55$) nahmen an der Studie teil. Wir haben sie gebeten, ihre Erfahrungen mit VR-Technologien und Computerspielen im Allgemeinen auf einer Skala von 1 (verwenden Sie selten VR-Technologien / spielen Sie Spiele) bis 7 (verwenden Sie sehr häufig VR-Technologien / spielen Sie Spiele) zu bewerten. Unsere Teilnehmer hatten wenig Erfahrung mit VR-Technologien ($M = 2.56$, $SD = 1.62$) und durchschnittliche Erfahrung mit Spielen ($M = 4.72$, $SD = 1.90$). Jeder Teilnehmer wurde für seine Zeit mit einem £ 10-Gutschein entschädigt. Jede Lernsitzung dauerte ungefähr 75 Minuten.

3.4 Vorgehensweise

Nach der Unterzeichnung eines Einverständniserklärungsformulars zur Beschreibung der Aufgabe bat der Ermittler die Teilnehmer, ihre demografischen Daten zu bestätigen. Wir haben dann die Teilnehmer gebeten, jede Gruppe von Objekten zu erreichen, während sie auf möglichst natürliche Weise gehen. Wir erklärten, dass wir ihr Bewegungsverhalten untersuchen wollten, ohne die verwendeten spezifischen Metriken zu erwähnen.

Die Teilnehmer fuhren drei Runden für jede der 12 von uns betrachteten Umgebungen. Um eine Basislinie zu erstellen, haben alle Teilnehmer die Aufgabe zuerst in der realen Welt ausgeführt (während sie das Headset über ihren Köpfen trugen, um ähnliche Bedingungen wie bei den anderen VEs zu simulieren). Nacheinander wiederholten sie die Aufgabe in einer virtuellen Nachbildung des Raums. Die vier Außen- und vier Innenumgebungen wurden dann in ausgeglichener Reihenfolge dargestellt. Neun Teilnehmer erlebten zuerst die Außenumgebung und neun andere zuerst die Innenumgebung. Darüber hinaus wurde auch die Reihenfolge der Präsentation innerhalb jedes Satzes ausgeglichen. Nach diesen 8 VEs und vor Abschluss der Studie haben wir die Teilnehmer gebeten, die Aufgabe zuerst in der virtuellen Replik und dann in der realen Welt zu wiederholen.

Zwischen jeder Sitzung (mit Ausnahme der letzten beiden wiederholten) haben wir die Teilnehmer gebeten, einen SUS-Fragebogen [34] zum Vorhandensein auszufüllen. Zusätzlich stellten wir ihnen drei weitere Fragen auf einer 7-Punkte-Skala, um festzustellen:

- 1) wie *ähnlich* Sie waren der Meinung, dass die Erfahrung des Gehens in der Umgebung mit der Idee verglichen wurde, in einer ähnlichen Umgebung in der Realität zu gehen (1 - völlig anders, 7 - genau gleich); 2) wenn sie fühlten *beschäftigt*, *verlobt* oder abgelenkt von der Idee, tatsächlich auf dieser Oberfläche zu gehen (1 - vollständig abgelenkt, 7 - vollständig beschäftigt); 3) ob die Umgebung ihr Bewegungsverhalten beeinflusst hat (1 - überhaupt nicht, 7 - vollständig). Alle Fragen wurden gestellt, während die Teilnehmer (bei abgenommenem Headset) auf der Couch ruhten. Schließlich für jede Umgebung,

Wir haben ein halbstrukturiertes Interview geführt, um Feedback aus ihren Erfahrungen zu erhalten.

3.5 Gerät

Hier beschreiben wir den physischen Raum, in dem die Studie stattfand, den technischen Rahmen für die Gestaltung der neun virtuellen Räume und die von unseren Teilnehmern verwendete Ausrüstung.

Der physische Raum - Die Studie fand in einem Raum statt, in dem 20 An den Wänden wurden Kameras der Vicon T10-Serie installiert, die von der Vicon Blade 2.6.1-Software verwaltet wurden. Sie wurden auf 60 Bilder eingestellt pro Sekunde. Das Volumen der zuverlässigen Erfassung war 6,3 m lang, 4 m breit und wurde an mit einer Deckenhöhe von 2,5m. Im physischen Raum waren acht Objekte kleine Sofas (0), ein perimetralen Stellen des Erfassungsbereichs platziert (siehe Abb. 2): zwei und ein Schreibtisch mit Stuhl Tisch mit zwei Stühlen (1), ein kleines Regal (2) sowie die Ausdehnung des Raums. Diese (3). Wir haben die Abmessungen aller Objekte gemessen, die ihre realen Gegenstücke ersetzen, und ihre Maßnahmen wurden verwendet, um die Repliken anzupassen. virtuellen Objekte modelliert

Der virtuelle Raum - Wir haben die neun VEs mit Unreal Engine 4.26.1 entworfen. Motor 4.6.1. Eine der VEs war eine Nachbildung des physischen Raums und der frei Möbel verwendet. Die in den anderen VEs verwendeten Assets wurden aus den Sammlungen verfügbaren "Open World", "Landscape and Mountains", "Particle" "Effects" und "Sci-Fi Hallway" in der Unreal Engine angepasst. (DK2) Headset. Wir haben vier Der Nutzer - Die Teilnehmer trugen ein Oculus Rift Development Kit 2 optische Marker installiert, einen am vorne in der Mitte und der Rest an den Seiten und hinten. Diese lieferten absolute Positionierungs- und Orientierungsdaten der Laute für den Standpunkt des Benutzers in den VEs. Mit dem internen DK2-Latenztester haben wir eine durchschnittliche Latenz von 30 ms gemessen. Da der DK2 nicht in einer drahtlosen Konfiguration verwendet werden kann, haben wir ein 10 m langes HDMI 1.4b-Kabel zusammen mit einer ähnlich langen USB-Erweiterung verwendet, um die Teilnehmer nicht mit einem Rucksack zu belasten. Während der Studie folgte einer der Ermittler dem Teilnehmer und stellte sicher, dass die Kabel ihre Bewegungen nicht behinderten.

Um das Gefühl der Propriozeption zu unterstützen, trugen die Teilnehmer auch ein Paar fingerlose Handschuhe mit einer Kombination aus vier optischen Markern, die jeweils oben angebracht waren. Die Marker wurden auf die Position und Ausrichtung von zwei virtuellen Handmodellen abgebildet, die der Benutzer in den VEs sehen konnte. Wir haben täglich alle Kameras und die virtuellen Hände des Benutzers neu kalibriert. Da jeder verfolgte „Knochen“ die Renderleistung zusätzlich belastet, konnten wir auch die Füße der Benutzer nicht verfolgen, da die Bildrate unter akzeptable Werte abfiel (Sony empfiehlt ein Minimum von 60 FPS [20]), wobei die Hardware eingeschaltet war unsere Entsorgung (ein MSI GS70). Deshalb haben wir Hände priorisiert, weil die Aufgabe das Berühren umfasst, während Füße nicht immer im Blick sind.

3.6 Analyse

Um zu untersuchen, wie sich die VEs auf das Bewegungsverhalten der Teilnehmer auswirkten, verwendeten wir eine Reihe quantitativer Metriken, die von Cirio et al. [4] beschrieben wurden. Die rohen Trajektorien wurden zuerst gefiltert, indem nur die extrahiert wurden



Abb. 3. In dieser Abbildung geben wir die mittleren Ergebnisse für jeden VE-Typ an. In Klammern ihre jeweilige Standardabweichung. Wichtige Werte in Bezug auf die Basisumgebung (der erste links) werden mit einem blauen Hintergrund angezeigt, wenn $p < 0,05$, mit grünem Hintergrund wenn $p < 0,01$. Trajektorien werden am Anfang mit einer grünen Farbe gezeichnet, die gegen Ende zunehmend blau wird. Die grün eingekreisten Zahlen repräsentieren die Position der drei Wegpunkte.

Teil zwischen den Punkten der nächsten Annäherung an den ersten Wegpunkt, zu Beginn der Runde und bei der Rückkehr. Somit werden der anfängliche Anflug in der ersten Runde und jede weitere Bewegung nach Beendigung der Runde und Rückkehr zum ersten Wegpunkt herausgefiltert. Die gefilterten Daten für jede Runde werden dann als aufeinanderfolgende Wiederholungen betrachtet.

Anfangsannahmen - Wir haben die Flugbahnergebnisse von verglichen die zwei Basisumgebungen in jedem Satz (*Gras im Freien* und *Indoor Base*) zu den vier VR-Laborumgebungen (*Reale Welt: Start* und

Ende; Replik: Starten und Ende) um die Annahme zu bestätigen, dass virtuelle Trajektorien mit Trajektorien übereinstimmen, die in übereinstimmenden (oder ähnlichen) physischen Umgebungen durchgeführt werden [4, 7]. Nacheinander haben wir die Ergebnisse der drei veränderten VEs mit den zugehörigen Basis-VE verglichen.

Trajektografische Metriken - Diese Metriken geben Auskunft über die Form der von den Teilnehmern durchgeführten Flugbahnen. Durch Vergleichen der Werte der veränderten VEs mit der Basis-VE können wir bestimmen, wo eine signifikante Abweichung von der kürzesten Trajektorie aufgetreten ist. Diese Maße werden auf den gefilterten Trajektorien berechnet.

Abweichung: Gefilterte Trajektorien wurden durch einen Satz von 100 äquidistanten Punkten neu abgetastet. Für jeden Punkt wurde der Absolutwert des senkrechten Abstandes zum nächsten Segment (in Zentimetern) genommen. Wir erwarteten, dass höhere signifikante Werte in diesen Kriterien zeigen würden, welche Umgebungen die Flugbahnen der Teilnehmer am meisten beeinflussen.

Abweichungsbereich: Durch Berechnung des senkrechten Abstands an jedem neu abgetasteten Punkt war es auch möglich, die Ausdehnung der Fläche zu berechnen, die die Differenz zwischen der Flugbahn des Teilnehmers und dem dreieckigen kürzesten Referenzweg (in Quadratmetern) darstellt.

Krümmung: Für jede Probe haben wir auch den mittleren Krümmungsradius der Trajektorie berechnet [7]. Diese Größe (in Metern) gibt an, wie stark die Flugbahn von einer geraden Linie abweicht.

Kinematikdaten - Wir haben auch Kinematikdaten wie berechnet die Summe *Entfernung* bedeckt (in Metern), die *Zeit* Jede Runde dauerte (in Sekunden; wiederum automatisch berechnet auf der gefilterten Flugbahn) und den Durchschnitt *Geschwindigkeit* während der Bewegung (in Zentimetern pro Sekunde).

4 R. ERGEBNISSE

Wir führten eine Einweg-ANOVA mit wiederholten Messungen (Greenhouse-Geisser korrigiert, falls erforderlich) unter Verwendung des Typs von durch *Änderung* in jedem VE als unsere unabhängige Variable und die zuvor beschriebenen Metriken als unsere abhängigen Variablen. Für jeden Teilnehmer haben wir 12 gesammelt *Änderung* \times 3 *Wiederholungen* Versuche mit insgesamt 648. Von diesen fehlten vier (0,6%) aufgrund von Fehlern im Protokollierungssystem, so dass 644 vollständige Flugbahnen übrig blieben. Nach jeder Umgebung (abgesehen von der endgültigen Bewertung des realen Labors und seiner VR-Replik) haben wir unseren Teilnehmer gebeten, einen SUS-Fragebogen [34] zum Vorhandensein auszufüllen und drei weitere Fragen zu beantworten, die in der *Verfahren* Sektion.

Die Ergebnisse (zusammengefasst in Abb. 3 und Abb. 4) bestätigen, dass sowohl das Vorhandensein immaterieller Objekte als auch das Design der Oberfläche einen signifikanten Einfluss auf das Bewegungsverhalten der Benutzer haben, erstere jedoch einen stärkeren Einfluss hatten.

4.1 Anfangsannahmen

In Bezug auf quantitative Maßnahmen konnten wir keinen signifikanten Unterschied zwischen den *Echte Welt*, das *Replik*, und die zwei veränderten Basisumgebungen (*Draussen* und *Indoor Base*). Die mittlere Abweichung in diesen VEs liegt im Bereich von 22 - 28 cm (siehe Abb. 3). Die visuelle Überprüfung der Trajektorien stützt die anfängliche Annahme, dass Trajektorien in virtuellen Repliken einer physischen Umgebung dazu neigen, realen Trajektorien zu entsprechen, wie von Fink et al. [7] und Cirio et al. [4]. Wir können dieses Ergebnis erweitern, indem wir feststellen, dass virtuelle Trajektorien selbst in VEs, die alle physischen Objekte durch nicht übereinstimmende virtuelle Gegenstücke von ungefähr derselben Größe ersetzen, tendenziell mit realen übereinstimmen.

Es wurden keine Unterschiede zwischen der anfänglichen und der endgültigen Bewertung des *Replik* und das *Echte Welt* abgesehen von ihrer Geschwindigkeit: Die Teilnehmer waren deutlich schneller ($M = 90,34$ cm / s) während des Finales *Echte Welt* Versuche als in der ersten VR *Replik* Einsen ($M = 75,28$ cm / s, verantwortlich für das erhöhte Vertrauen, das im weiteren Verlauf der Studie aufgebaut wurde.

4.2 Trajektografische Maßnahmen

Wir fanden einen signifikanten Effekt von *Änderung* für alle Flugbahnen Metriken: *Abweichung* ($F_{(11,187)} = 32,04, p < 0,01$), *Bereich der Abweichung* ($(F_{(11,187)} = 32,05, p < 0,01)$ und *Krümmung* ($F_{(11,187)} = 25,57, p < 0,01$). Diese Ergebnisse und die visuelle Analyse der mittleren Flugbahnen (siehe Abb. 3) zeigen, dass in einigen VEs eine signifikante Abweichung vom kürzesten Verlauf aufgetreten ist.

Paarweise Vergleiche (Bonferroni korrigiert) zwischen den veränderten VEs und ihren Basis-VE ermöglichen es uns, je nach abhängig zwei Sätze zu identifizieren das Ausmaß der Abweichung. Die erste ist die Menge der VEs, die eine hatten, repräsentiert jene VEs, die eine Hauptauswirkung auf Benutzerverläufe (*Objekte* und *Wände*); der zweite Satz und *Dunkel* VEs). Die geringere, aber immer noch signifikante Auswirkung hatten (*Wasser* mittleren Trajektorien der VEs im ersten Satz zeigen Dies steht im Gegensatz zu der Route, die sie in den eine fast rechteckige Form mit einer durchschnittlichen Abweichung von ca. 60 cm. Sie folgten Basis-VEs durchgeführt haben, wo sie eine durchschnittliche Abweichung von ca. 37 cm zeigen, 38% dem kürzesten Weg. Die mittleren Flugbahnen in der Sekunde niedriger. Diese Ergebnisse sind Betroffen von einer Minderheit von Teilnehmern, die den visuellen Konflikt im zentralen Bereich unterschiedlich interpretierten und sich für einen Übergang entschieden. Tatsächlich liegen die Mindestabweichungswerte zwischen 36,06 cm in der *Wasser* VE (mehr als die lange Größe eines A4-Blattes) auf die 65,23 cm des *Wände* VE (mehr als die durchschnittliche Länge eines menschlichen Arms). Die Teilnehmer zeigten auch größere Krümmungsradien in den veränderten VEs als in den Basislinien, was auf gerade Wege hinweist.

4.3 Kinematische Metriken

Die Analyse kinematischer Metriken wie *Pfadlänge* ($F_{(11,187)} = 28,72, p < 0,01$), *Geschwindigkeit* ($F_{(11,187)} = 26,00, p < 0,01$) und *Zeit* ($(F_{(11,187)} = 20,96, p < 0,01)$) waren ebenfalls signifikant. Diese Ergebnisse unterstützen den stärkeren Effekt der veränderten VEs in Innenräumen. In dem *Objekte* und *Wände*, Dies führte zu Flugbahnen, die deutlich länger waren und langsamer abgeschlossen wurden. In der Tat beobachteten wir, wie sich die Teilnehmer vorsichtiger um immaterielle Hindernisse bewegten und Kollisionen instinktiv vermieden. Stattdessen wurden in den Außen-VEs die Änderungen durch unterschiedliche Oberflächen dargestellt, wodurch keine Kollisionen in der Nähe des zentralen Bereichs möglich waren.

4.4 Fragebögen

Die Ergebnisse sind in Abb. 4 zusammengefasst. Abgesehen von der erwarteten Signifikanz Unterschiede in Bezug auf die Präsenz ($F_{(9,153)} = 14,23, p < 0,01$) zwischen dem realen Zustand und allen neun VEs fanden wir eine signifikante Unterschied ($p < 0,05$) zwischen dem *Eis* VE ($M = 1,11, SD = 1,75$) und die *Wände* ($M = 3,50, SD = 2,07$) und *Dunkel* ($M = 3,72, SD = 2,44$) VEs ($p = 0,017$). In der Tat fühlten sich die Teilnehmer in der EU weniger präsent *Eis* VE und, obwohl nicht signifikant, in der *Wasser* VE ($M = 1,56, SD = 2,25$). Insgesamt waren die Indoor-VEs mit einem aggregierten Durchschnitt von 2,77 am glaubwürdigsten ($SD = 2,38$) im Gegensatz zu 1,74 ($SD =$

2,19) für die Outdoor-VEs.

Analog wurden keine Unterschiede für die gefundenen *Ähnlichkeit* und *Engagement* Fragen, außer denen zwischen dem realen Zustand und den neun VEs. In Bezug auf die Frage, inwieweit die Teilnehmer das Gefühl hatten, dass ihr Bewegungsverhalten beeinflusst wurde, stellten wir einen signifikanten Unterschied fest ($p < 0,01$) zwischen dem realen Zustand ($M = 2,33, SD = 1,71$) und alle sechs veränderten VEs (aggregierter Durchschnitt von 4,52, $SD = 2,00$) ohne Berücksichtigung ihrer jeweiligen Basis-VE, dh *Im-Tür* und *Draussen* Base. Die dem *Replik* VE ($M = 3,00, SD = 1,46$) war signifikant anders ($p < \text{Nur } 0,01$) im Vergleich zu den *Objekte* ($M = 5,88, SD = 1,23$) und zum *Wände* ($(M = 5,83, SD = 1,04)$ VEs. Dies könnte bedeuten, dass sich die Flugbahn weniger drastisch ändert (z. B. in der *Wasser* VE) ist es schwieriger zu bemerken, obwohl die Teilnehmer betroffen waren.

5 D. ISCUSSION

Es ist allgemein bekannt, dass das Sehen andere Sinne dominiert [10], und VR ist keine Ausnahme [22]. Von dem Moment an, in dem wir das Headset aufsetzen, müssen wir uns auf unsere Vision verlassen, um unsere Entscheidungen über die Umgebung zu treffen, in der wir uns befinden. Daher haben wir unsere Teilnehmer explizit in Situationen gebracht, in denen sie sich des Konflikts zwischen dem, was sie sahen und dem, unbewusst bewusst waren Sie wussten von der realen Umgebung.

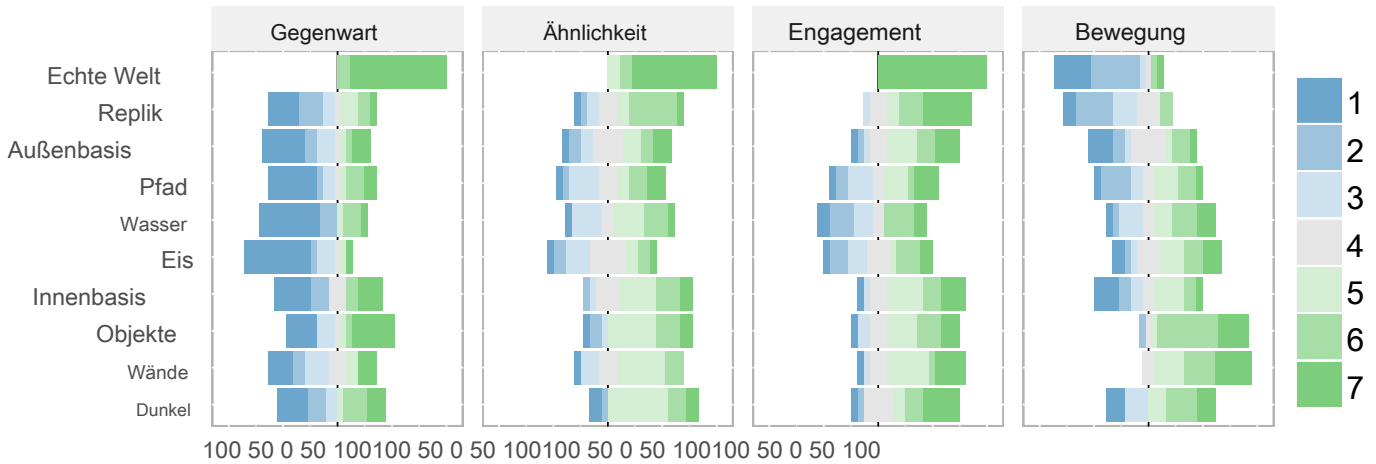


Abb. 4. Die Abbildung zeigt die Verteilung der Presence- und Likert-Scores, gruppiert nach den zehn Umgebungen. Da die Anwesenheitsbewertung als die Summe von 6 und 7 Antworten auf die sechs Fragen im SUS-Fragebogen berechnet wird, können die Bewertungen zwischen 0 (dunkelblau) und 6 (dunkelgrün) liegen. In den anderen drei Darstellungen reichen die Antworten von 1 bis 7 und beziehen sich auf die drei gestellten Fragen: „Wie *ähnlich* war Ihre Erfahrung mit diesem VE im Vergleich zum wirklichen Leben?“, „Wie *beschäftigt, verlobt* Warst du auf der Idee, wirklich in diesem VE zu laufen?“, „Wie sehr hat sich dieses VE auf dein VE ausgewirkt *Bewegung* Verhalten?“.

Wir wollten die Gründe für das Verhalten unserer Teilnehmer besser verstehen und wissen, wie wir es beeinflussen können. In diesem Abschnitt diskutieren wir, was die Teilnehmer dazu veranlasste, die visuellen Reize einzuhalten oder zu widerlegen. Nacheinander präsentieren wir Designrichtlinien und diskutieren die Forschungsherausforderungen, die sich aus dieser Studie ergeben haben.

5.1 Anhaftendes Verhalten

Mit „anhaftendem Verhalten“ meinen wir die Reihe von Aktionen, die darauf hinweisen, dass die Teilnehmer an den visuellen Reizen festhielten und sich so verhalten, wie es unter analogen Bedingungen in der realen Welt normalerweise zu erwarten wäre. Zum Beispiel, um einen Wasserteich herumzulaufen, anstatt ihn zu durchqueren, wenn dies nicht ausdrücklich erforderlich ist, oder um zu vermeiden, durch eine Wand zu gehen usw. Nach jeder Umgebung haben wir die Teilnehmer nach ihren Beobachtungen zu ihren Erfahrungen befragt. In den Basisumgebungen (*Replik*, *Außenbasis*, und *Indoor Base*), Alle Teilnehmer nahmen eine Route nahe der kürzesten zwischen den Wegpunkten, wie aus ihren mittleren Flugbahnen in Abb. 3 hervorgeht.

Das Verhalten von Teilnehmern, die sich dafür entscheiden, sich an die visuellen Reize zu halten, lässt sich auf zwei Hauptmotive zurückführen: Routineverhalten, das in früheren realen Situationen gelernt wurde, und Angst vor nachteiligen Folgen. In dem *Pfad* In diesem Szenario dachten wir, dass ein tatsächlicher Pfad eine Route vorschlagen könnte, der wir folgen sollten. Wir beobachteten vier Teilnehmer, die sich an den Weg hielten. Auf die Frage, warum sie dies getan haben, kommentierte Teilnehmer Nr. 4: „*Ich fühlte mich gezwungen, dem Weg zu folgen. Ich kam aus so einem Dorf. Ich weiß nicht, warum ich gefolgt bin. Ich hatte das Gefühl, ich musste.*“ Teilnehmer Nr. 13 sagte: „*Der Weg war sehr verlockend zu folgen, was ich teilweise getan habe. Ich kann nicht erklären [warum ich ihm gefolgt bin].*“ Teilnehmer Nr. 14:

„*Ich bin dem Weg gefolgt, weil er im Weg war und es bequem war, ihm zu folgen.*“ Diese Antworten unterstreichen, dass die Teilnehmer instinktiv dem Weg folgten und das Verhalten widerspiegeln, das die Teilnehmer auch im wirklichen Leben annehmen würden.

Teilnehmer, die beschlossen, um den Teich herumzulaufen, obwohl dies die Länge ihrer Route verlängert hätte, taten dies, weil sie sich nicht sicher waren, was passieren würde, wenn sie darüber gingen. In dem *Wasser* In diesem Szenario weisen unsere quantitativen Messungen darauf hin, dass sich die Flugbahnen erheblich von den direktesten unterscheiden. Teilnehmer Nr. 10 sagte „*Ich habe den Teich gemieden, weil ich dachte, ich kann nicht darüber laufen. Ich hatte Angst, durchzugehen.*“ Ebenso Teilnehmer Nr. 17: „*Ich bin um das Wasser herumgegangen. Ich wollte vermeiden, nass zu werden.*“ In der Tat würden wir ohne zwingenden Grund wahrscheinlich nicht in einen Wasserteich treten: Wenn wir nur auf die andere Seite gehen müssen, werden wir nach einer einfacheren Route suchen. Diese Ergebnisse tragen zum Beweis bei, dass sich Menschen in VR-Situationen realistisch verhalten [30, 31].

Dieses Verhalten steht im Widerspruch zu den niedrigeren Anwesenheitswerten, die dem zugewiesen sind *Wasser* Szenario. Die Mehrheit der Teilnehmer gab an, dass sie sich in der VE nicht „*präsent*“ fühlten (mit einem Durchschnittswert von 1,56 von)

7). Die Entscheidung, den Wasserteich zu meiden, deutet jedoch darauf hin, dass während des Versuchs die Angst vor dem möglichen Negativ besteht

Die Konsequenzen waren stark genug, um ihr Bewusstsein für die Simulation zu überwinden und Illusion. Die technischen Hindernisse, die das Bewusstsein für das stärken. Dies unterstützt die Teilnehmer nicht daran zu hindern, realistisch darauf zu reagieren. zum traditionellen Begriff die These von Slater, der alternative Konzepte von vorschlägt *Platziere die Illusion* und *Plausibilität* der Präsenz in VR [29], bestehend aus den beiden zum Konzept von „*da sein*“, während letzteres Ersteres bezieht sich

ist „*Die Illusion, die sicher weiß, dass es nicht ist*“ [30].

Was anscheinend passiert, passiert wirklich (obwohl Sie

Die Angst vor Konsequenzen war einer der Hauptgründe für das Verhalten im Innenbereich ausgestellt *Objekte* und *Wände* Szenarien: „*Sie könnten es vermeiden, durch eine Wand zu gehen, weil es eine Konsequenz geben könnte.*“ (#5);

„*Ich wollte nicht durch [die Wände] gehen. Ich war mir nicht sicher, was passieren würde, wenn ich durchgehen würde.*“ (#6); „*Ich habe [die Objekte] gemieden, weil ich das im wirklichen Leben mache.*“ (#8). Andere Kommentare legen auch nahe, dass die Interaktion mit materiellen Objekten, die mit immateriellen Objekten in derselben Umgebung gemischt sind, die Illusion verstärkt, dass sie alle greifbar sein könnten: „*Weil ich nicht wusste, was echt ist und was nicht, um sicher zu sein, dass ich mich entschlossen habe, herumzulaufen.*“ (#6); „*Ich denke, wenn man Objekte hat, die man fühlen kann, glaubt man, dass alle Objekte real sind.*“ (#15). Ein Teilnehmer hat das kommentiert „*Aus Höflichkeit habe ich mich nicht so berührt wie im wirklichen Leben.*“ (#7). Andere kommentierten, dass sie absichtlich vermieden haben, dort zu interagieren, wo sie nicht benötigt wurden: „*Ich möchte es mir nicht verderben. Ich möchte nicht [mit den Objekten] herumspielen. Ich möchte im Charakter bleiben.*“ (#9); „*Ich wusste, dass [die Mauer] nicht wirklich da war und ich wollte die Umwelt respektieren.*“ (#11). Daher sind weitere Untersuchungen erforderlich, um festzustellen, ob dieses Verhalten auf die kontrollierten Bedingungen der Studie zurückzuführen ist und ob Benutzer in einer komfortableren Situation (z. B. zu Hause) eher dazu neigen, die Grenzen des Systems zu entdecken.

In dem *Eis* In diesem Szenario beobachteten wir nur fünf Teilnehmer (von 18), die aktiv versuchten, um das Eis herumzulaufen. Auf die Frage nach dem Grund erkannte die Mehrheit der Teilnehmer die eisige Oberfläche nicht und dachte, es handele sich um Fels oder sogar Sand. Wir haben unsere Implementierung der Eisoberfläche auf hochmodernen Echtzeit-Shadern basiert. Es hat jedoch nicht unser beabsichtigtes Ergebnis hervorgerufen. Diese Art der Mehrdeutigkeit wurde auch von Simeone et al. [27] wo die Teilnehmer unterschiedliche Erwartungen an die Temperatur oder das Gewicht eines virtuellen Objekts hatten, basierend auf ihrer Interpretation seines Materials.

Hinsichtlich der *Dunkel* Umwelt, die Mehrheit der Teilnehmer (11) interpretierte es als unbeleuchteten Boden. Einige waren jedoch verwirrt darüber, woraus es genau bestand: Metall, Kunststoff oder festes Glas über einer Grube. Die verbleibenden sieben Teilnehmer hielten den zentralen Bereich für eine ungeschützte Grube und mieden ihn aus diesem Grund: „*Die Mitte des Raumes*

war wie ein Loch. Zur Selbsterhaltung wollte ich nicht fallen. " (#9). Wir beobachteten, wie ihr Verhalten vollständig davon abhing, wie sie den zentralen Bereich interpretierten: Sieben Teilnehmer nahmen den kürzesten Weg, weil sie ihn für solide hielten oder keine Änderungen bemerkten. Der Rest, der Angst vor dem wahrgenommenen Tropfen hatte oder sich nicht sicher war, was in der Mitte lag, beschloss, dies zu vermeiden: *"Es sah wegen der Dunkelheit nicht ansprechend aus."* (#4).

5.2 Nicht anhaftendes Verhalten

Mit „nicht anhaftend“ meinen wir, die visuellen Reize explizit abzulehnen, indem Handlungen ausgeführt werden, die in der Realität nicht möglich (z. B. durch Wände gehen) oder unwahrscheinlich (durch einen flachen Teich gehen, um auf die andere Seite zu gelangen, wenn keine vorhanden sind) besondere Gründe, ins Wasser zu gehen). Wir wollten die Faktoren verstehen, die die Teilnehmer dazu veranlassten, sich so zu verhalten, damit sie angesprochen werden können. Wir gehen davon aus, dass das Handeln in Übereinstimmung mit den visuellen Reizen eine gewünschte Qualität in einer VR-Simulation ist. Wenn „übermenschliches“ oder unrealistisches Verhalten gewünscht wird, sollte das Benutzerverhalten aus einer anderen Perspektive untersucht werden.

Wir haben drei Hauptmotive für nicht anhaftendes Verhalten beobachtet: *Pragmatismus*, ein *ausdrücklicher Wunsch*, die *Grenzen des Systems zu testen*, und das *falsche Interpretation der visuellen Reize*. In dem *Pfad* Szenario, Teilnehmer Nr. 9 weicht von der vorgeschlagenen Route ab: *„Ich habe die Ecke geschnitten. Ich denke, ich sollte am Ende pragmatisch sein.“* Aufgrund der Einschränkungen einer kontrollierten Studie war es nicht offensichtlich, dem Pfad zu folgen, anstatt direkt auf jeden Wegpunkt zuzugehen. Es ist daher denkbar, dass in einem tatsächlichen Szenario, in dem der Pfad zu einem bestimmten Ort führt, Benutzer eher dazu neigen, dem Pfad zu folgen, als durch das Unterholz zu gehen, wo Felsen oder Äste uns davon abhalten könnten, einem kürzeren Pfad zu folgen.

Andere Benutzer werden versuchen, die Grenzen des Systems zu testen. In dem *Wasser* In diesem Szenario beobachteten wir, wie einige Teilnehmer versuchsweise versuchten, in den Teich zu treten. Teilnehmer Nr. 4 erklärte: *„Ich ging über das Wasser, um zu sehen, ob es reagierte.“* Dieses Gefühl wurde von vier anderen Teilnehmern geteilt. Auf die Frage „Was würde Sie dazu bringen, die Idee, ins Wasser zu treten, zu überdenken?“ Antworteten die Teilnehmer, dass sie sich zurückgezogen hätten, wenn das Wasser durch einen Welleneffekt reagiert hätte. Dies steht im Einklang mit den Überlegungen von Slater, die die VR liefern sollte *„Korrelationen zwischen externen Ereignissen, die nicht direkt vom Teilnehmer verursacht werden, und seinen eigenen Empfindungen (sowohl exterozeptiv als auch interozeptiv)“* [30]. Wir fügten jedoch hinzu, dass die VE auch auf Ereignisse reagieren sollte, die direkt vom Teilnehmer verursacht werden.

Wir beobachteten sechs Teilnehmer, die versuchten, die Objekte zu berühren oder durch die Wände zu gehen. Wir haben sie gefragt, warum sie das getan haben. Die allgemeine Antwort war, dass sie sehen wollten, wie es sich anfühlte: *„Ich habe nachgesehen, was passieren würde. Es war für meine Augen unangenehm, weil ich völlige Dunkelheit sah und dann zum Licht zurückkehrte“* (#17). Drei dieser sechs Teilnehmer gingen den ganzen Weg: *„Ich war neugierig zu sehen, was passiert, wenn ich durch gehe. Es war unangenehm, hineinzugehen. Ich habe versucht, mich mit meinen Händen zu schützen“* (#2). Der Bereich innerhalb der Wände war hohl und die gleichen Texturen auf der sichtbaren Seite waren von innen zu beobachten. Diese Antworten deuten darauf hin, dass Benutzer möglicherweise nicht absichtlich mit Wänden kollidieren, die sie zum ersten Mal erlebt haben. Ein Teilnehmer versuchte zu erklären, warum die immateriellen Wände nicht da waren: *„Mein Gehirn sagte mir, ich könnte nicht berühren, weil ich zu weit weg war“* (#4). Analog zum *Eis* und *Dunkel* Szenario: Die korrekte Interpretation der Umgebung ist von grundlegender Bedeutung. Wir haben zwei Teilnehmer beobachtet, die die Pfadoberfläche absichtlich vermieden haben, weil sie dachten, sie sei aus Schlamm und damit gefährlich: *„Ich wollte über den Schlamm klettern. Ich habe mich gefragt, ob es sicher ist oder ob es eine Art Falle ist“* (#12). In der Tat bemühten sie sich bewusst, ihre Füße nicht auf die Teile der Oberfläche zu stellen, auf denen die Pfadstruktur angewendet wurde. Die Teilnehmer erwarteten auch einen Höhenunterschied zwischen dem Pfad und dem Rest des Bodens: *„Der Weg hätte mich gebraucht, um meine Füße auf eine [niedrigere] Höhe zu stellen“* (#1).

Eine visuelle Überprüfung der Trajektorien zeigt, dass die Teilnehmer von der Reihenfolge, in der die VEs präsentiert wurden, nicht betroffen waren. Es schien nicht wahrscheinlicher zu sein, dass sie an den visuellen Reizen haften, wenn sie die stärkeren Veränderungen erfahren hatten (dh *Wände* oder *Objekte*) vor den anderen. Zum Beispiel hielten sich 4 von 9 Teilnehmern, die zuerst VEs in Innenräumen erlebten, nicht an die visuellen Reize und entschieden sich für einen Übergang

stattdessen. Die Teilnehmer waren sich jederzeit der Leere des zentralen Bereichs bewusst, daher sind wir der Ansicht, dass der Effekt auf das Design des VE und seine Änderungen zurückzuführen ist. Wenn das Experiment ohne vorherige Kenntnis der Raumaufteilung durchgeführt werden soll, wird angesichts unserer Ergebnisse und der Annahme, dass virtuelle Objekte mit physischen Proxys gepaart sind, erwartet, dass der Effekt der Abweichung größer ist, als dies der Fall wäre sich ausschließlich auf die visuellen Reize zu verlassen, um zu verstehen, wo das Gehen sicher ist.

5.3 Auswirkungen auf das Design

Nach der Analyse der Ergebnisse unserer Studie und des Benutzerverhaltens haben wir eine Reihe von Richtlinien für Designer zukünftiger VR-Erfahrungen extrahiert.

Eindeutige ästhetische Veränderungen können das Benutzerverhalten beeinflussen

Unsere Ergebnisse zeigen, wie es möglich ist, das Bewegungsverhalten des Benutzers durch Manipulation des Erscheinungsbilds von Oberflächen zu beeinflussen. Der Effekt, den wir auf die Flugbahnen der Teilnehmer beobachteten, trat mit ihrem Bewusstsein für die physische Anordnung des Raums auf. Oberflächen, die beim Betreten auf mögliche negative Folgen hindeuten, sind möglicherweise am besten geeignet, um diesen Effekt zu erzielen, sofern ihr Erscheinungsbild eindeutig realistisch ist.

Der Einfluss des visuellen Realismus in der VR ist oft umstritten. Es gibt Studien, die signifikante Unterschiede in Bezug auf Verhalten oder Präsenz berichteten [9, 31, 49], und solche, die keine schlüssigen Beweise fanden [17, 44, 52]. Anders als in früheren Arbeiten hat unsere Studie die Teilnehmer mit Entscheidungen konfrontiert, die vollständig von ihrer korrekten Interpretation der visuellen Reize abhingen. Wir beobachteten ein völlig anderes Verhalten, unabhängig davon, ob die Teilnehmer die eiseige Oberfläche als solche oder als etwas weniger Gefährliches wie Stein oder Sand interpretierten. Wir sind daher der Ansicht, dass dort, wo die Rendering-Funktionen noch nicht so weit fortgeschritten sind, dass diese Mehrdeutigkeiten minimiert werden, die visuellen Elemente durch Kontextinformationen ergänzt werden müssen. Zum Beispiel durch physikalisch reagierende VEs (z. B. durch Zeigen von Rissen im Eis, sobald sie betreten wurden), intelligente Agenten [16], oder Erzählmethoden. Zukünftige Arbeiten sollten untersuchen, ob das Verhalten auch von Oberflächen beeinflusst wird, deren Aussehen sich im Laufe der Zeit ändert, oder von sich bewegenden Hindernissen. Zum Beispiel Wellen an der Küste, expandierender Lavastrom usw.

Verwendung von Änderungen

Basierend auf unseren Ergebnissen sind wir der Meinung, dass Änderungen an der Oberfläche in erster Linie verwendet werden sollten, um Benutzer zu ermutigen, bestimmte Routen einzuschlagen. Zum Beispiel, um Benutzer zu Sonderzielen zu führen. Umgekehrt bieten immaterielle Objekte eine wirkungsvollere Abmahnung, wenn versucht werden soll, Benutzer daran zu hindern, sich auf bestimmte Orte (z. B. in der Nähe von zerbrechlichen Gegenständen) zu bewegen. Beide Methoden sind jedoch passive Methoden und sollten als letztes Mittel durch aktive offene Methoden (z. B. Barrieren) ergänzt werden. Zum Beispiel, wenn Sie versuchen, sich außerhalb des verfolgten Bereichs zu bewegen.

Immaterielle Objekte sollten keine Interaktionsmöglichkeiten bieten

Die Ergebnisse stützen die Idee, dass immaterielle Objekte einen starken Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Benutzers haben können. Basierend auf unseren Beobachtungen und der Häufigkeit, mit der Benutzer versuchten, mit diesen immateriellen Objekten zu interagieren, sind wir der Ansicht, dass diejenigen, die begrenzte oder keine Interaktionsmöglichkeiten bieten, am besten geeignet sind, um „Unterbrechungen der Präsenz“ zu minimieren [32]. Wir haben Assets wie Rohre oder glatte Wände ausgewählt, um den zentralen Bereich in der *Objekte* und *Wände* VEs. Diese hatten keine expliziten Merkmale, die Interaktionsmöglichkeiten vorschlugen (wie Schalter oder Hebel). Somit können diese Hindernisse in einem VE so platziert werden, dass Benutzer zu den Bereichen in der Umgebung geführt werden, die von physischen Proxys unterstützt werden.

Änderungen können den in der VE wahrgenommenen Raum erweitern oder einschränken

Im Zusammenhang mit VEs, die teilweise von physischen Objekten unterstützt werden, können Designer durch Änderungen an der Gestaltung von Oberflächen und die Einführung immaterieller Hindernisse VEs darstellen, die größer oder kleiner sind als die tatsächliche physische Umgebung, in der die VR-Erfahrung stattfindet. Die meisten Teilnehmer entschieden sich dafür, die Hindernisse in der Umgebung zu umgehen *Objekte*

und *Wände* Szenarien. Dies ermöglicht es Designern, immaterielle Wände einzuführen, um schmale Flure in einem größeren Raum darzustellen und gleichzeitig die Aufhebung des Unglaubens aufrechtzuerhalten. Umgekehrt können VEs erweitert werden, indem entweder Oberflächen verwendet werden, die Benutzer davon abhalten, über sie zu gehen, oder indem immaterielle Hindernisse überwunden werden. Zum Beispiel eine Lichtung mit Blick auf eine Klippe, eine Küste, Fenster usw.

5.4 Offene Herausforderungen

Die Studie ermöglichte es uns auch, Herausforderungen zu identifizieren, die weitere Aufmerksamkeit in der Forschung erfordern, die wir im Folgenden hervorheben.

Grafischer Realismus und Mehrdeutigkeit - Die Bedingungen, unter denen wir getestet haben Dieses Experiment ist nur eine Teilmenge unzähliger Möglichkeiten. Zukünftige Forschungen sollten systematisch einen umfassenden Satz physikalischer Oberflächen bewerten, der verschiedene physikalische Eigenschaften (z. B. Rauheit, Reibung, Temperatur usw.) und deren Auswirkungen auf das Benutzerverhalten veranschaulicht. Darüber hinaus könnte die Untersuchung der Feinheit der grafischen Darstellung visueller Reize ermöglichen, festzustellen, ob bestimmte Rendering-Funktionen die korrekte Interpretation ihrer wahrgenommenen Leistungen erheblich beeinflussen können.

Höhenunterschiede - In dem *Pfad* In diesem Szenario gaben die Teilnehmer an, dass sie erwarteten, dass der tatsächliche Fußweg eine geringere Höhe als das nahe gelegene Gras haben würde. Wir wissen, dass selbst relativ kleine Höhenunterschiede einen großen Einfluss auf die Aufhebung des Unglaubens haben können [13]. Wir beobachteten einen Trend zu größeren mittleren Abweichungen, je höher die Höhe der Veränderungen war. Obwohl es keine ausreichenden Beweise dafür gab, könnte eine systematische Bewertung verschiedener Hindernishöhen und -volumina feststellen, ob diese Faktoren einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Benutzerverläufe haben.

Übergang zu neuen Standorten - In dieser Studie haben wir uns auf VEs konzentriert deren Ausmaß sich mit der physischen Umgebung überschneidet. Dies ist jedoch ein begrenzender Faktor für VR-Ergebnisse mit mehreren Standorten. Wenn jeder Ort der physischen Umgebung zugeordnet ist, müssen zukünftige Arbeiten Formen von Übergängen zwischen Umgebungen untersuchen, die die Aufhebung des Unglaubens aufrechterhalten [36]. Zum Beispiel beim Übergang von drinnen in eine Außenumgebung, die größer als der physische Raum ist. Roman *umgeleitetes Gehen* Techniken, die auf Umgebungen im Raummaßstab und in überfüllten Umgebungen angewendet werden, könnten eine Lösung bieten.

Synchronisation - In unserer Studie haben wir uns auf statische VEs konzentriert. Es ist jedoch denkbar, dass durch Benutzerbewegung oder externe Agentur (virtuelle Agenten, Ereignisse in der Erzählung) die Position von beweglichen Objekten beeinflusst werden könnte. Wenn Objekte mit physischen Proxys gekoppelt sind, würde dies dazu führen, dass die VE nicht mehr mit der physischen Umgebung synchronisiert ist. Die Verfolgung der gesamten physischen Umgebung in einem häuslichen Umfeld ist mit erheblichen technischen Herausforderungen verbunden. Die Unterstützung der natürlichen Interaktion in freier Form in der häuslichen VR erfordert daher neuartige Ansätze. Beispielsweise können Drohnen verwendet werden, um sich in der physischen Welt zu bewegen, ein Objekt, das sich nur in der VE bewegt hat, um die Synchronisation wiederherzustellen.

6 C. SCHLUSSFOLGERUNG

In diesem Artikel haben wir untersucht, wie Benutzer reagieren, wenn sie mit visuellen Reizen konfrontiert werden, die im Widerspruch zu ihrem Bewusstsein für die physische Umgebung stehen. Wenn Sie wissen, wie Sie das Bewegungsverhalten der Benutzer beeinflussen können, können Sie virtuelle Umgebungen erstellen, in denen Benutzer subtil geführt werden, wo die Interaktion durch greifbare Elemente unterstützt wird, oder von den Grenzen des Verfolgungsbereichs und von fragilen Objekten in der realen Welt ferngehalten werden. Wir haben eine Studie entworfen, in der die Teilnehmer gebeten wurden, drei Wegpunkte zu erreichen, die so angeordnet sind, dass sie auf dem kürzesten Weg einen zentralen Bereich durchqueren müssen. Wir haben das Erscheinungsbild dieses zentralen Bereichs auf zwei Arten manipuliert: indem wir sein ästhetisches Erscheinungsbild durch verschiedene Oberflächen verändert und verschiedene Arten von immateriellen Objekten platziert haben.

Quantitative Ergebnisse zeigen, dass das ästhetische Erscheinungsbild der Oberfläche die Flugbahnen der Benutzer beeinflusst, solange sie ihre Eigenschaften korrekt interpretieren können. Immaterielle Objekte beeinflussen auch das Benutzerverhalten und sollen zur Glaubwürdigkeit der gesamten Erfahrung beitragen. Das Benutzerverhalten wird durch die Wahrnehmung negativer Konsequenzen aus Erfahrungen im realen Leben und durch die Erwartung beeinflusst, dass die virtuelle Umgebung auf ihre Aktionen reagiert. Die Studie hob auch vier offene Hauptherausforderungen hervor: Untersuchung weiterer Beispiele für ästhetische Veränderungen und Höhenunterschiede, das Problem der Übergänge zwischen Standorten und die Synchronisation zwischen der virtuellen und der physischen Umgebung.

EIN BESTÄTIGUNGEN

Diese Arbeit wurde vom Research Accelerator Fund der University of Portsmouth unterstützt.

R. EFERENZEN

- [1] S. Bonneauud, K. Rio, P. Chevallier und WH Warren. Berücksichtigung von Mustern des kollektiven Verhaltens in der Dynamik des Crowd Locomotor für realistische Simulationen. Im *Transaktionen auf Edutainment VII*, S. 1–11. Springer, 2012.
- [2] D. Bowman, D. Koller, LF Hodges et al. Reisen in immersiven virtuellen Umgebungen: Eine Bewertung der Techniken zur Bewegungssteuerung von Blickwinkeln. Im *Proceedings of the Virtual Reality Jährliches Internationales Symposium*, S. 45–52. IEEE, 1997.
- [3] G. Bruder, F. Steinicke und P. Wieland. Selbstbewegungssimulationen in immersiven Virtual-Reality-Umgebungen. Im *2011 IEEE Virtual Reality Konferenz*, S. 39–46. IEEE, 2011.
- [4] G. Cirio, A. Olivier, M. Marchal und J. Pettré. Kinematische Auswertung virtueller Laufbahnen. *IEEE-Transaktionen zu Visualisierung und Computergrafik*, 19 (4): 671–680, April 2013.
- [5] BR Fajen. Leistungswahrnehmung und visuelle Kontrolle der Fortbewegung. Im *Menschliches Gehen in virtuellen Umgebungen*, S. 79–98. Springer, 2013.
- [6] J. Feasel, MC Whitton und JD Wendt. Llcm-Wip: Niedrige Latenz, kontinuierliche Bewegung an Ort und Stelle. Im *Vorträge des IEEE-Symposiums für 3D-Benutzeroberflächen*, S. 97–104. IEEE, 2008.
- [7] PW Fink, PS Foo und WH Warren. Vermeidung von Hindernissen beim Gehen in realen und virtuellen Umgebungen. *ACM-Transaktionen zur angewandten Wahrnehmung (TAP)*, 4 (1): 2. Januar 2007.
- [8] S. Freitag, D. Rausch und T. Kühlen. Neuorientierung in virtuellen Umgebungen mithilfe interaktiver Portale. Im *Vorträge des IEEE-Symposiums zu 3D-Benutzeroberflächen*, S. 119–122. IEEE, 2014.
- [9] M. Garau, M. Slater, V. Vinayagamoorthy, A. Brogni, A. Steed und MA Sasse. Der Einfluss von Avatar-Realismus und Blickkontrolle auf die wahrgenommene Qualität der Kommunikation in einer gemeinsamen immersiven virtuellen Umgebung. Im *Vorträge der SIGCHI-Konferenz über menschliche Faktoren in Computersystemen*, S. 529–536. ACM, New York, NY, USA, 2003.
- [10] JJ Gibson. Anpassung, Nachwirkung und Kontrast bei der Wahrnehmung gekrümmter Linien. *Zeitschrift für experimentelle Psychologie*, 16 (1): 1. Februar 1933.
- [11] LF Hodges, R. Kooper, TC Meyer, BO Rothbaum, D. Opdyke, JJ De Graaff, JS Williford und MM North. Virtuelle Umgebungen zur Behandlung der Höhenangst. *Computer*, 28 (7): 27–34, Juli 1995.
- [12] E. Hodgson, E. Bachmann und D. Waller. Umgeleitetes Gehen zur Erkundung virtueller Umgebungen: Bewertung des Potenzials räumlicher Interferenzen. *ACM-Transaktionen zur angewandten Wahrnehmung (TAP)*, 8 (4): 22. Dezember 2008.
- [13] BE Insko. *Passive Haptik verbessert virtuelle Umgebungen erheblich*. Doktorarbeit, Universität von North Carolina in Chapel Hill, 2001.
- [14] V. Interrante, B. Ries und L. Anderson. Sieben Liga-Stiefel: Eine neue Metapher für eine verbesserte Fortbewegung durch mäßig große, immersive virtuelle Umgebungen. Im *Vorträge des IEEE-Symposiums zu 3D-Benutzeroberflächen*. IEEE, 2007.
- [15] L. Kohli, E. Burns, D. Miller und H. Fuchs. Passives Hap- kombinieren Tics mit umgeleitetem Gehen. Im *Berichte der internationalen Konferenz 2005 über Augmented Tele-Existenz*, S. 253–254. ACM, 2005.
- [16] M. Luck und R. Aylett. Anwendung künstlicher Intelligenz auf die virtuelle Realität: Intelligente virtuelle Umgebungen. *Angewandte künstliche Intelligenz*, 14 (1): 3–32, 2000.
- [17] K. Mania und A. Robinson. Die Auswirkung der Qualität des Renderns auf die Eindrücke der Benutzerbeleuchtung und die Präsenz in virtuellen Umgebungen. Im *Berichte der internationalen ACM SIGGRAPH-Konferenz 2004 über das Kontinuum der virtuellen Realität und seine Anwendungen in der Industrie*, S. 200–205. ACM, New York, NY, USA, 2004.
- [18] RP McMahan, D. Bowman, DJ Zielinski, RB Brady et al. Bewertung der Anzeige- und Interaktionsgenauigkeit in einem Virtual-Reality-Spiel. *IEEE-Transaktionen zu Visualisierung und Computergrafik*, 18 (4): 626–633, April 2012.
- [19] CT Neth, JL Souman, D. Engel, U. Kloos, HH Bulthoff und BJ Mohler. Geschwindigkeitsabhängiger dynamischer Krümmungsgewinn für umgeleitetes Gehen. *IEEE-Transaktionen zu Visualisierung und Computergrafik*, 18 (7): 1041–1052, 2012.
- [20] C. Norden. Playstation VR: Entwicklung und Innovationen, 2013. Game Developers Conference (GDC).
- [21] TC Peck, H. Fuchs und MC Whitton. Evaluierung von Neuorientierungstechniken und Ablenkern für das Gehen in großen virtuellen Umgebungen. *IEEE-Transaktionen zu Visualisierung und Computergrafik*, 15 (3): 383–394, Mai-Juni 2009.
- [22] S. Razaque, Z. Kohn und MC Whitton. Umgeleitetes Gehen. Im *Verfahren von EUROGRAPHICS*, vol. 9, S. 105–106, 2001.

- [23] S. Razzaque, D. Swapp, M. Slater, MC Whitton und A. Steed. Umgelenktes Gehen an Ort und Stelle. Im *ACM International Conference Proceeding Series*, vol. 23 von *EGVE '02*, S. 123–130. Eurographics Association, 2002.
- [24] RA Ruddle und S. Lessels. Die Vorteile der Verwendung einer Laufschnittstelle zum Navigieren in virtuellen Umgebungen. *ACM-Transaktionen zur Computer-Mensch-Interaktion (TOCHI)*, 16 (1): 5. April 2009.
- [25] RA Ruddle, E. Volkova und SH Bülthoff. In der virtuellen Realität laufen lernen. *ACM-Transaktionen zur angewandten Wahrnehmung (TAP)*, 10 (2): 11. Juni 2013.
- [26] FA Sanz, A.-H. Olivier, G. Bruder, J. Pettré und A. Lécuyer. Virtuelle Proxemics: Fortbewegung bei Vorhandensein von Hindernissen in großen immersiven Projektionsumgebungen. Im *2015 IEEE Virtual Reality (VR)*, S. 75–80. IEEE, 2015.
- [27] AL Simeone, E. Velloso und H. Gellersen. Substitutionelle Realität: Verwenden der physischen Umgebung zum Entwerfen von Virtual-Reality-Erlebnissen. Im *Berichte der 33. jährlichen ACM-Konferenz über Human Factors in Computersystemen*, S. 3307–3316. ACM, New York, NY, USA, Januar 2015.
- [28] AL Simeone. Substitutionelle Realität: Auf dem Weg zu einer Forschungsagenda. Im *Vorträge des 1. Workshops zur alltäglichen virtuellen Realität (WEVR)*, S. 19–22. IEEE, März 2015.
- [29] M. Slater. Wie bunt war dein Tag? Warum Fragebögen die Präsenz in virtuellen Umgebungen nicht bewerten können. *Präsenz: Teleoperatoren und virtuelle Umgebungen*, 13 (4): 484–493, August 2004.
- [30] M. Slater. Platzillusion und Plausibilität können zu realisiertem Verhalten in immersiven virtuellen Umgebungen führen. *Philosophische Transaktionen der Royal Society B: Biologische Wissenschaften*, 364 (1535): 3549–3557, November 2009.
- [31] M. Slater, P. Khanna, J. Mortensen und I. Yu. Visueller Realismus verbessert die realistische Reaktion in einer immersiven virtuellen Umgebung. *Computergrafik und -anwendungen, IEEE*, 29 (3): 76–84, Mai 2009.
- [32] M. Slater und A. Steed. Ein virtueller Präsenzzähler. *Gegenwart*, 9 (5): 413–434, Oktober 2000.
- [33] M. Slater, A. Steed und M. Usoh. Das virtuelle Laufband: Eine naturalistische Metapher für die Navigation in immersiven virtuellen Umgebungen. In M. Gbel, Hrsg., *Virtuelle Umgebungen 95*, Eurographics, 2011. S. 135–148. Springer Wien, 1995.
- [34] M. Slater, M. Usoh und A. Steed. Schritte unternehmen: Der Einfluss einer Gehtechnik auf die Präsenz in der virtuellen Realität. *ACM-Transaktionen zur Computer-Mensch-Interaktion*, 2 (3): 201–219, September 1995.
- [35] JL Souman, PR Giordano, M. Schwaiger, I. Frissen, T. Thümmel, H. Ulbrich, AD Luca, SH Bülthoff und MO Ernst. Cyberwalk: Ermöglichen eines uneingeschränkten omnidirektionalen Gehens durch virtuelle Umgebungen. *ACM-Transaktionen zur angewandten Wahrnehmung (TAP)*, 8 (4): 25. Dezember 2011.
- [36] F. Steinicke, G. Bruder, K. Hinrichs, M. Lappe, B. Ries und V. Interrante. Übergangsumgebungen verbessern die Fernwahrnehmung in immersiven Virtual-Reality-Systemen. Im *Vorträge des 6. Symposiums zur angewandten Wahrnehmung in Grafik und Visualisierung*, S. 19–26. ACM, 2009.
- [37] F. Steinicke, G. Bruder, J. Jerald, H. Frenz und M. Lappe. Analyse der Empfindlichkeit des Menschen gegenüber umgeleiteter Gehen. Im *Vorträge des ACM-Symposiums 2008 zu Virtual Reality-Software und -Technologie*, S. 149–156. ACM, 2008.
- [38] F. Steinicke, G. Bruder, J. Jerald, H. Frenz und M. Lappe. Schätzung der Erkennungsschwellen für umgeleitete Gehtechniken. *IEEE-Transaktionen zu Visualisierung und Computergrafik*, 16 (1): 17–27, Januar-Februar 2010.
- [39] F. Steinicke, G. Bruder, L. Kohli, J. Jerald und K. Hinrichs. Taxonomie und Implementierung von Umleitungstechniken für allgegenwärtiges passives haptisches Feedback. Im *Vorträge der Internationalen Konferenz über Cyberwelten*, S. 217–223. IEEE, 2008.
- [40] E. Suma, G. Bruder, F. Steinicke, DM Krum, M. Bolas et al. Eine Taxonomie für die Bereitstellung von Umleitungstechniken in immersiven virtuellen Umgebungen. Im *IEEE Virtual Reality Workshops (VRW)*, S. 43–46. IEEE, 2012.
- [41] E. Suma, SL Finkelstein, M. Reid, SV Babu, AC Ulinski, LF Hodges et al. Bewertung der kognitiven Effekte der Reisetchnik in komplexen realen und virtuellen Umgebungen. *IEEE-Transaktionen zu Visualisierung und Computergrafik*, 16 (4): 690–702, Juli-August 2010.
- [42] JN Templeman, PS Denbrook und LE Sibert. Virtuelle Fortbewegung: Gehen Sie an Ort und Stelle durch virtuelle Umgebungen. *Gegenwart*, 8 (6): 598–617, Dezember 1999.
- [43] M. Usoh, K. Arthur, MC Whitton, R. Bastos, A. Steed, M. Slater und FP Brooks Jr. Im *Vorträge der 26. Jahreskonferenz über Computergrafik und interaktive Techniken*, S. 359–364. ACM Press / Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, USA, 1999.
- [44] V. Vinayagamoorthy, A. Brogni, P. Gillies, M. Slater und A. Steed. Eine Untersuchung der Präsenzreaktion über Variationen des visuellen Realismus hinweg. Im *Vorträge des 7. jährlichen internationalen Präsenzworkshops*, S. 148–155, 2004.
- [45] WH Warren und BR Fajen. Verhaltensdynamik der visuell geführten Fortbewegung. Im *Koordination: neuronale, Verhaltens- und soziale Dynamik*, S. 45–75. Springer, 2008.
- [46] MC Whitton, JV Cohn, J. Feasel, P. Zimmons, S. Razzaque, SJ Poulton, B. McLeod und FP Brooks Jr. Im *Verfahren der IEEE Virtual Reality*, S. 123–130. IEEE, Washington, DC, USA, 2005.
- [47] B. Williams, S. Bailey, G. Narasimham, M. Li und B. Bodenheimer. Bewertung des Gehens auf einem Wii-Balance-Board zur Erkundung einer virtuellen Umgebung. *ACM-Transaktionen zur angewandten Wahrnehmung*, 8 (3): 19: 1–19: 14, August 2011.
- [48] B. Williams, G. Narasimham, B. Rump, TP McNamara, TH Carr, J. Rieser und B. Bodenheimer. Erkunden großer virtueller Umgebungen mit einem HMD, wenn der physische Speicherplatz begrenzt ist. Im *Vorträge des 4. Symposiums zur angewandten Wahrnehmung in Grafik und Visualisierung*, S. 41–48. ACM, New York, NY, USA, 2007.
- [49] I. Yu, J. Mortensen, P. Khanna, B. Spanlang und M. Slater. Visueller Realismus verbessert die realistische Reaktion in einer immersiven virtuellen Umgebung - Teil 2. *Computergrafik und -anwendungen, IEEE*, 32 (6): 36–45, November 2012.
- [50] C. Zankaba, BC Lok, SV Babu, AC Ulinski, LF Hodges et al. Vergleich von Pfadvisualisierungen und kognitiven Maßnahmen in Bezug auf die Reisetchnik in einer virtuellen Umgebung. *Visualisierung und Computergrafik, IEEE-Transaktionen auf*, 11 (6): 694–705, November 2005.
- [51] DJ Zielinski, RP McMahan und RB Brady. Shadow Walking: Eine unbelastete Fortbewegungstechnik für Systeme mit Unterbodenprojektion. Im *Verfahren der IEEE Virtual Reality*, S. 167–170. IEEE,
- [52] P. Zimmons und A. Panter. Der Einfluss der Renderqualität auf Präsenz und Aufgabenleistung in einer virtuellen Umgebung. Im *Verfahren der IEEE Virtual Reality*, S. 293–294. IEEE, 2003.