



Internationale Zeitschrift für virtuelle Realität  
*Band 20 Ausgabe 1*

Cherni H., Métayer N. und Souliman N. (2020). Literaturübersicht über Fortbewegungstechniken in der virtuellen Realität. ***Internationale Zeitschrift für virtuelle Realität, 20*** (1), 1-20.

<https://doi.org/10.20870/IJVR.2020.20.1.3183>

CC BY 4.0 Lizenz

Eingegangen am 10/2019

Veröffentlicht: 3/2020

# Literaturübersicht über Fortbewegungstechniken in der virtuellen Realität

Heni Cherni <sup>1</sup>, Natacha Métayer <sup>1</sup>, Nicolas Souliman <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut VEDECOM, 23 bis allée des Marronniers, 78000 Versailles

Korrespondierender Autor: Heni Cherni, [heni.cherni@vedecom.fr](mailto:heni.cherni@vedecom.fr)

**Schlüsselwörter:** Virtuelle Realität - Fortbewegung - Navigationstechniken - Literaturrecherche

## Abstrakt

Diese Studie stellt eine systematische Literaturübersicht dar, in der wir die Fortbewegungstechniken in der virtuellen Realität zwischen 2012 und 2019 untersucht haben. Wir haben 22 Fortbewegungsmethoden analysiert und verglichen, die wir in 26 in unserer Übersicht enthaltenen Artikeln identifiziert haben. Ziel ist es, relevante Fortbewegungstechniken und deren Auswirkungen auf die Benutzererfahrung besser zu verstehen. Die Überprüfung der Literatur hat eine breite Palette unterschiedlicher Fortbewegungstechniken gezeigt, wobei jede Technik durch unterschiedliche Vor- und Nachteile gekennzeichnet ist. Klassische Fortbewegungstechniken wie der Joystick übertrafen jedoch alle in den überprüften Studien vorgeschlagenen Techniken. Wir haben auch eine Taxonomie und zwei Arten der Bewertung von Fortbewegungstechniken in einer virtuellen Umgebung vorgeschlagen.

## 1. Einleitung

Die virtuelle Realität ermöglicht es dem Benutzer, sich aus der realen Umgebung zu extrahieren, um in eine virtuelle Umgebung einzutauchen, in der er beobachten, interagieren, Dialoge führen und sogar neue Fähigkeiten erlernen kann. Diese Flexibilität hat in verschiedenen Bereichen wie Robotik, Stadtplanung, Industrie, Kunst und Bildung usw. neue Horizonte eröffnet. Beispielsweise kann ein Flugzeugpilot bei schlechtem Wetter für schwierige Landungssituationen trainieren, ohne sich selbst oder seine Passagiere zu gefährden. Ein Chirurg kann in einem bestimmten Eingriff geschult werden, bevor er ihn tatsächlich ausführt. Darüber hinaus gibt es Situationen, die in der realen Welt schwer zu reproduzieren sind, wie z. B. eine Zugentgleisung oder eine chirurgische Komplikation. Benutzer können dann komplexe Situationen nach Belieben in einer kontrollierbaren Umgebung trainieren und wiederholen (Cherni, 2012). In den letzten zehn Jahren Der technologische Fortschritt hat die Benutzererfahrung in der virtuellen Welt erheblich verbessert. Trotz der Tatsache, dass Fortbewegung nicht das Hauptziel von Virtual-Reality-Anwendungen ist, wird sie als eine der wichtigsten Komponenten der Interaktion in Virtual-Reality-Erlebnissen angesehen, da sie für die Erkundung der virtuellen Umgebung unverzichtbar und entscheidend ist (Lee et al., 2018) ). Das Aufkommen neuer Virtual-Reality-Geräte wie der kommerziellen Versionen des HTC Vive und des Oculus Rift markierte den Beginn dessen, was einige Forscher als „eine neue Ära in der Geschichte der virtuellen Realität“ bezeichnen. In dieser neuen Ära wurden gängige Fortbewegungsgeräte wie Standard-Gamecontroller und Joysticks gezeigt, die nicht angepasst sind und in immersiven virtuellen Umgebungen zu Desorientierung führen (Lathrop & Kaiser, 2002; Ruddle & Lessels, 2006). So, Es ist nicht klar, wie eine virtuelle Umgebung effektiv und kostengünstig erkundet werden kann. Auf diese Weise wurde die Suche nach einer effizienten Methode, um den Spieler in der virtuellen Umgebung zu bewegen, zu einer der wichtigsten Herausforderungen und führte zu einem erneuten Interesse an den Fortbewegungstechniken in der virtuellen Umgebung. Die Fortbewegung der virtuellen Realität ermöglicht es dem Benutzer, sich in einer virtuellen Welt mit unendlichem Maßstab zu bewegen. Sie kann als selbstfahrende Bewegung in der virtuellen Umgebung definiert werden, während sie in einer realen Umgebung im Raummaßstab eingeschlossen bleibt (Hale & Stanney, 2014). Fortbewegung ist eine wesentliche Form der Mensch-Computer-Interaktion. In der virtuellen Realität wirkt es sich direkt auf viele Aspekte der Benutzererfahrung aus, wie z. B. Genuss, Frustration, Müdigkeit, Reisekrankheit und Präsenz.

Fortbewegung in der virtuellen Welt. Wenn die virtuelle Umgebung jedoch größer als die physische Umgebung ist, muss eine alternative Fortbewegungsmethode verwendet werden. Folglich sind neue Fortbewegungstechniken entstanden. Die Wahl der Fortbewegungstechnik ist hinsichtlich Verständnis, Entwicklung, Verwendung und Experimentieren noch nicht erschlossen. Die Suche nach einer effizienten Fortbewegungstechnik, die das Vorhandensein nicht verändert, keine Reisekrankheit verursacht und keine Müdigkeit vermeidet, stellt eine echte Herausforderung dar, die heute Gegenstand zahlreicher Forschungsstudien geworden ist (Bowman et al., 2004; Kitson et al., 2017a) ).

In diesem Artikel präsentieren und diskutieren wir die wichtigsten Fortbewegungstechniken, die von Januar 2012 bis April 2019 in der virtuellen Realität verwendet und untersucht wurden. Der Hauptzweck besteht darin, Richtlinien bereitzustellen, die Forschern bei der Auswahl der angepassten Fortbewegungstechnik helfen können den Zweck ihres Experiments und die damit verbundenen Anwendungsfälle in der virtuellen Umgebung.

## 2. Methodik

Diese Studie wurde gemäß den Richtlinien durchgeführt, die auf zehn Hauptschritten basieren, die für eine systematische Literaturrecherche erforderlich sind, die von Brereton und Kollegen (2007) vorgeschlagen wurde (siehe Abbildung 1).

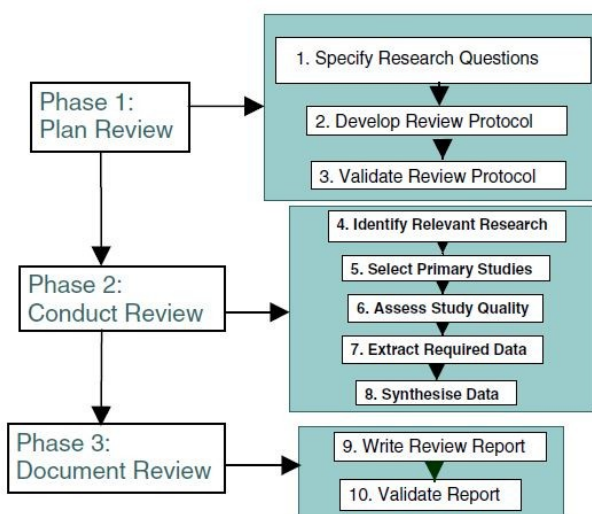


Figure 1. Systematischer Literaturrechercheprozess von Brereton et al. (2007)

### 2.1. Fragestellung

Um die Literaturrecherche durchzuführen, haben wir die folgende Forschungsfrage identifiziert: Welche Fortbewegungstechniken in virtuellen Umgebungen werden in Forschungsstudien verwendet und wie haben sie sich in den letzten sechs Jahren entwickelt?

### 2.2. Identifizierung relevanter Studien

Um relevante Artikel zu identifizieren, die Fortbewegungstechniken in der virtuellen Umgebung untersuchen, wurde eine gezielte Suche unter Verwendung von Schlüsselwörtern durchgeführt: [ *virtuelle Realität*, *Bewegung*, *Navigationstechniken*, *Fortbewegung* ], in der Google Scholar Datenbank. Unsere Suche konzentrierte sich auf Studien, die zwischen Januar 2012 und April 2019 veröffentlicht wurden. Eine Vorauswahl basierend auf den Abstracts des Artikels wurde verwendet, um die relevanten Studien zu identifizieren.

Drei Einschlusskriterien wurden berücksichtigt:

- Nur in englischer oder französischer Sprache verfasste Beiträge;
- Nur Artikel, die eine empirische Studie zu Fortbewegungstechniken in einer virtuellen Umgebung darstellen;
- Nur Artikel, die mindestens eine Fortbewegungstechnik studieren.

Nach der ersten Forschungsphase auf der Grundlage der Abstracts des Artikels wurden 61 Artikel als relevant erachtet. Nach der zweiten Phase wurden 26 Artikel ausgewählt und in unsere Studie aufgenommen.

### 3. Datenerfassung

Die Identifizierung von Fortbewegungstechniken (LT) in virtuellen Umgebungen, ihre Eigenschaften und der Zweck der mit diesen Techniken durchgeführten Studien sind in Tabelle 1 dargestellt. Insgesamt wurden 22 Fortbewegungstechniken identifiziert.

**Tabelle 1. Hauptbewegungstechniken in virtuellen Umgebungen**

Studie und Zweck	Fortbewegungstechnik
(*) Vorschlag einer neuartigen Walking-in-Place-Methode unter Verwendung von Positions- und Orientierungsverfolgung und Vergleich mit vorhandenen Walking-in-Place-Techniken unter Verwendung von Sensoren zur Erkennung des Gehens (Lee et al., 2018)	-- Walking-in-Place -- Neue Variante von Walking-in-Place
(*) Vorschlag von zwei neuen Walking-In-Techniken Platzieren Sie es in einer virtuellen Umgebung mit neuen gestischen Eingaben und vergleichen Sie es mit der vorhandenen (Nilsson et al., 2013)	-- An Ort und Stelle tippen
Vergleichsstudie zwischen Teleportation und zwei klassische Virtual-Reality-Fortbewegungstechniken in einer Navigationsaufgabe in einer virtuellen Umgebung (Bozgeyikli et al., 2016b)	-- Walking-in-Place -- Joystick zeigen und teleportieren (vom Benutzer verfolgte Hand)
(*) Einführung einer neuen Implementierungsmethode Walking-in-Place mit einem preiswerten Beschleunigungssensor. Bewerten Sie dann diese Methode des Walking-in-Place, indem Sie sie mit der normalen vergleichen Gehen und Armschwingen (Wilson et al., 2016) (*)	-- Gehen -- Walking-in-Place -- Arm schwingen
Verbesserung der Fortbewegung vor Ort Technik durch Hinzufügen von Hinweisen im Zusammenhang mit dem Gehen wie dem Fußhaptiksystem und akustischen Rückmeldungen (Kruiff et al., 2016)	-- Walking-in-Place -- Verbesserte Variante von Walking-in-Place
(*) Vorschlag eines neuen Ansatzes für das Gehen an Ort und Stelle Fortbewegungstechnik, mit der Menschen beim Gehen auf linearen Pfaden ihre virtuelle Geschwindigkeit basierend auf Schrittlamplituden- und Geschwindigkeitsmetriken steuern können. Diese Methode wird dann mit klassischen Walking-in-Place-Techniken verglichen, die darauf basieren  Schrittfrequenz (Bruno et al., 2013)	-- Walking-in-Place -- Neue Variante von Walking-in-Place
Implementierung einer neuen Fortbewegungstechnik basierend auf Händen Gesten, die von einem kostengünstigen Sensor namens „Myo Armband“ erfasst und mit Joystick- und Walking-in-Place-Ansätzen verglichen werden (McCullough et al., 2015)	-- Myo Arm (Armschwingen) -- Walking-in-Place -- Joystick
Vorschlag eines neuen Ansatzes für die Fortbewegung in der virtuellen Welt Realität mithilfe der Trägheitssensoren des Smartphones zur Erkennung die Benutzerschritte (Tregillus & Folmer, 2016)	-- Walking-in-Place
Testen Sie vier verschiedene Hände frei, leicht zu erlernen und Kostengünstige Freisprech-Navigationsmethoden und Vergleich mit einer Standard-Gamepad-Steuerung in einer virtuellen Umgebung mit am Kopf montiertem Display (Zielasko et al., 2016)	-- Walking-in-Place -- Gaspedal -- Lehnen (in sitzender Position) Schütteln -- Sie den Kopf -- Joystick
Vergleich einer kostengünstigen neuen Lehnmethode basierend	-- Körper gelehnt -- Walking-in-Place

auf Wii-Balance zum Joystick und Walking-in-Place-Fortbewegungstechnik in einer Navigationsaufgabe in a virtuelle Umgebung (Harris et al., 2014)	-- Joystick
Konzentration auf die Auswirkungen des statischen und dynamischen Obermaterials Körperneigung kombiniert mit dem Joystick in Bezug auf wahrgenommene zurückgelegte Entfernungen und Selbstbewegungswahrnehmung (Kruijff et al., 2015)	-- Lehnender Körper + Joystick
Vorschlag und Bewertung der Verwendbarkeit von zwei Fortbewegungstechniken, beide basierend auf einer Kombination aus visuellen Kontrollen und Handgesten unter Verwendung kostengünstiger Sensoren (Caggianese et al., 2015)	-- Kombinierte Verfolgung von Kopf und Hand des Benutzers
Vergleich von Joystick und vier neuen Fortbewegungstechniken bei einer Zielfindungsaufgabe in einer informationsreichen virtuellen Umgebung (Kitson et al., 2017a)	-- Joystick -- MuvMan (sitzender / stehender aktiver Hocker) -- Head-Directed (basierend auf HMD-Orientierungen) -- NaviChair (Drehhocker mit Federn) Drehstuhl (ein Stuhl mit Lehnfähigkeiten)
Untersuchen Sie die Auswirkungen des NaviChair, einer neuen Motion-Cueing-Fortbewegungstechnik auf die räumliche Aktualisierung im Vergleich zu einer herkömmlichen nicht verkörperten Schnittstelle (der Joystick) (Kitson et al., 2015)	-- NaviChair -- Joystick
Entwerfen und Implementieren einer neuen High-Fidelity Fortbewegungstechnik: Human Joystick und Vergleich mit Joystick (McMahan et al., 2012) Untersuchung der	-- Menschlicher Joystick -- Klassischer Joystick-Controller
Wirksamkeit einer neuen Fortbewegung Technik basierend auf der Bewegungserfassung von verschiedenen Körperteile des Benutzers (Guy et al., 2015) Vorschlag einer neuen	-- LazyNav
Fortbewegungsmethode basierend auf Druckkissen zur Erkundung der virtuellen Umgebung in sitzender Position (Ohshima et al., 2016)	Intuitive Schiebeeinheit
Implementierung und Vergleich von acht Fortbewegungstechniken in einer immersiven Virtual-Reality-Testumgebung (Bozgeyikli et al., 2016a)	-- Umgeleitetes Gehen -- Walking-in-Place -- Hände zittern -- Fliegend -- Zeigen und teleportieren -- Joystick-Controller -- Schrittmaschine -- Trackball-Controller
Analyse der gegenseitigen Beeinflussung zwischen umgeleitetem Gehen und zwei verschiedenen (verbalen und räumlichen) Arbeitsgedächtnisaufgaben mithilfe einer Dual-Tasking-Methode (Bruder et al., 2015)	-- Umgeleitetes Gehen
Vergleich der Auswirkungen von 3 Navigation Techniken (natürlich, naturnah und künstlich) zur Durchführung einer Navigationsaufgabe (Nabiyouni et al., 2015)	-- Virtuspäre -- Echter Spaziergang -- Joystick
Vergleich zweier Fortbewegungstechniken Methoden: ein Laufband für die Fortbewegung, das Bewegungen in alle Richtungen unterstützt, und Arm Swinging, das Bewegungen vom Schwingen erkennt Hin und Her der Benutzer (Calandra et al., 2018). Vorschlagen und	-- Omnidirektionales Virtual-Reality-Laufband Arm -- Swinging
Testen einer neuen naturnahen virtuellen Reality-Fortbewegungstechniken: omnidirektional	-- Omnidirektionales Laufband -- Joystick

Laufband (Warren & Bowman, 2017)	
Studie über die Verwendung eines Skateboard-Simulators zu Navigieren in einer virtuellen Umgebung (Sato et al., 2015) Vergleich der Punkt- und Teleport-Fortbewegung	-- VibroSkate: Skateboard-Simulator
Technik, setzt die Bewegung fort (Joystick) und eine neue Form der Punkt- und Teleportmethode, die auf einer schnellen und kontinuierlichen Bewegung zu einem ausgewählten Knoten basiert (Habgood et al., 2018)	-- Zeigen und teleportieren (mit HTC VIVE-Controllern) Joystick --
Vergleich der Freude, Frustration, Anstrengung, Entfernung, Okklusion, Eintauchen und Reisekrankheit zwischen der Punkt- und Teleport-Fortbewegungstechnik und dem Trackpad in einer virtuellen Realität Erfahrung (Linn, 2017)	-- HTC Vive-Controller: Trackpad zeigen und teleportieren --
Vergleich von drei Fortbewegungstechniken: umstrittene Bewegung, Teleportation und World-InMiniature (Berger & Wolf, 2018)	-- Welt in Miniatur -- Kontinuierliche Bewegung (OculusTouch Joystick) -- Teleportieren (mit Handgesten)

Anmerkungen. (\*) Fortbewegungstechnik (LT), die eine Erweiterung oder Verbesserung eines anderen bereits vorhandenen LT darstellt.

#### 4. Fortbewegungstechniken in der virtuellen Umgebung

Das Finden einer intuitiven, effizienten und nicht teuren Fortbewegungstechnik war das Hauptziel der in Tabelle 1 oben genannten Studien. Auf der allgemeinsten Ebene ist es möglich, zwischen Techniken zu unterscheiden, die den Körper des Benutzers verwenden, indem verschiedene Teile davon verfolgt werden, um zu bestimmen, ob der Benutzer geht oder nicht, und Techniken, die ein externes Peripheriegerät verwenden, um sich in der virtuellen Umgebung entweder zum Simulieren des Gehens oder zum Bewegen zu bewegen mit einem "nicht natürlichen" Weg.

##### 4.1. Fortbewegungstechniken Taxonomie

Wie im nächsten Abschnitt hervorgehoben wird, konnten wir anhand der Literaturübersicht und der Untersuchung der Merkmale der Fortbewegungstechniken drei Hauptkategorien von Fortbewegungsmethoden unterscheiden: benutzerkörperzentrierte Methoden, externe periphere zentrierte Methoden und Methoden, die sowohl den Körper des Benutzers als auch die externe Peripherie verwenden. Jeder von ihnen kann in viele verschiedene Unterkategorien unterteilt werden.

Abbildung 2 zeigt unsere vorgeschlagene Taxonomie von Fortbewegungstechniken in der virtuellen Realität.

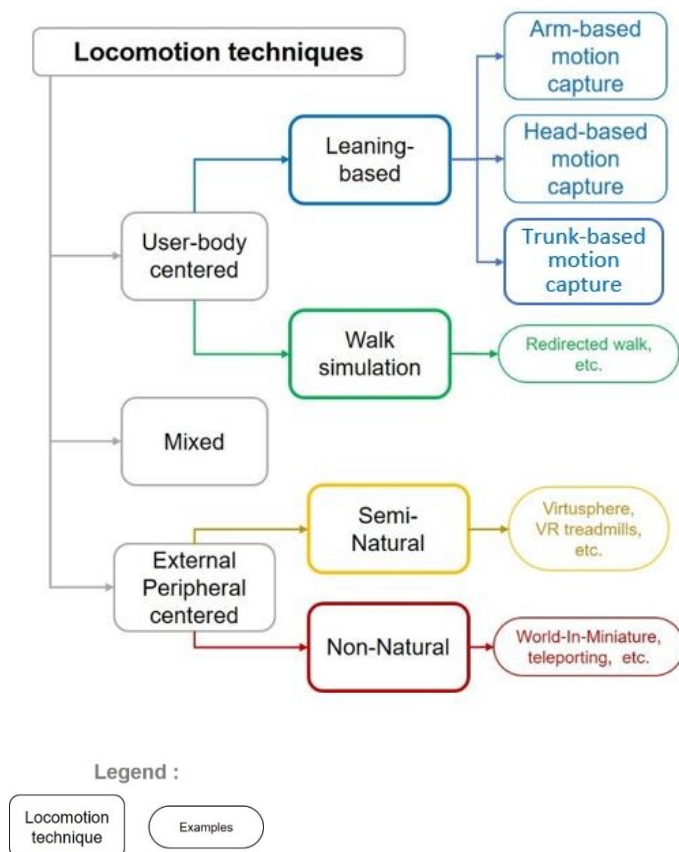


Abbildung 2. Taxonomie der Fortbewegungstechniken der virtuellen Realität.

In Bezug auf unsere vorgeschlagene Taxonomie der Fortbewegungstechniken in der virtuellen Realität können wir feststellen, dass neun der zweiundzwanzig identifizierten Fortbewegungstechniken zur Kategorie der Neigung gehören, die über 52% der identifizierten Fortbewegungstechniken darstellt. Der naturnahe Ansatz steht bei den nichtnatürlichen Ansätzen an zweiter Stelle. Jedes repräsentiert ungefähr 17% der identifizierten Fortbewegungsmethoden. Dann finden wir die kombinierten Ansätze mit ungefähr 9%, gefolgt von den Laufsimulationsansätzen, die ungefähr 4% der identifizierten Techniken darstellen (siehe Abbildung 3). Dies zeigt, dass die meisten Studien in den besprochenen Arbeiten an die Kraft lehnensbasierter Methoden glaubten. Für die meisten von ihnen scheint der intuitivste Weg, die optimale Fortbewegungstechnik in der virtuellen Umgebung zu finden, darin zu bestehen, die Cueing-Strategie für Körperbewegungen zu untersuchen.

2 Der Farbcode dient zur visuellen Unterscheidung der verschiedenen Kategorien von Fortbewegungstechniken und ist zwischen Abbildung 2, Abbildung 3, Tabelle 2 und Tabelle 3 identisch.

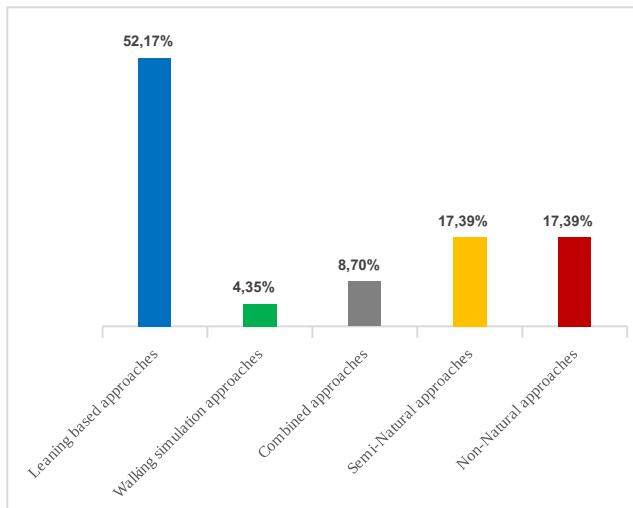


Abbildung 3. Prozentsatz der Verteilung der identifizierten Fortbewegungstechniken gemäß unserer Taxonomie

## 4.2. User-Body-zentrierte Techniken

### 4.2.1. Leaning-basierte Fortbewegungstechniken (LT)

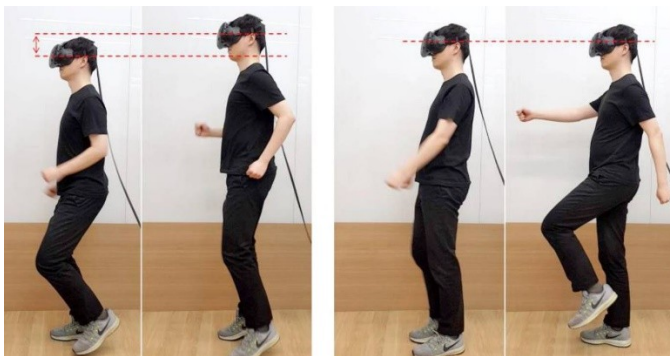
Im Interesse der Steigerung des Selbstbewegungsgefühls des Benutzers, der Verbesserung der räumlichen Wahrnehmung und Orientierung sowie des Benutzererlebnisses wurde in mehreren Studien versucht, die beste Fortbewegungstechnik zu finden, indem die Strategie der Cueing-Funktion für Körperbewegungen beibehalten wurde, um durch die virtuelle Umgebung zu gehen (Bowman et al., 1998, 2004; Riecke et al., 2010). Bei lehn-basierten Fortbewegungstechniken wird das Gehen erreicht, indem der gesamte Körper oder nur Teile davon in die gewünschte Richtung gelehnt werden. Die Neigung selbst kann durch Standard-Tracking-Technologie oder mit speziellen Geräten wie Kraftmessplatten wie der Wii-Balance-Karte erkannt werden (Zielasko et al., 2016). Verschiedene Körperteile werden erfasst, um festzustellen, ob sich der Benutzer bewegt oder nicht. In diesen Studien können wir Fortbewegungstechniken unterscheiden, die das Rumpfbewegungs-Cueing verwendeten, die auf Kopfverfolgung basieren.

#### Kopfbasierte Bewegungserfassung LT

Bei den auf Kopfbewegungen basierenden Fortbewegungstechniken, die üblicherweise als „Kopfschütteln“ bezeichnet werden, steuern die Kopfdrehung und -neigung die simulierten Übergänge und Rotationen in der virtuellen Umgebung (Kitson et al., 2017a; McMahan et al., 2012; Zielasko et al., 2016). Bei dieser Methode wird die verfolgte Position und / oder Drehung des Kopfes des Benutzers verwendet, um durch die virtuelle Umgebung zu gehen. Eine der gebräuchlichsten auf Neigung basierenden Fortbewegungstechniken, die auf der Erfassung der Kopfbewegung unter Verwendung der am Kopf montierten Anzeigeposition basieren, ist die echte Gehmethode. In ihren Studien haben Wilson et al. (2016) und Nabiyouni et al. (2015) verglichen die natürliche Gehmethode in einer virtuellen Umgebung mit anderen gängigen Fortbewegungstechniken. Basierend auf mehreren Parametern wie der Anzahl der Fehler in der erforderlichen Aufgabe, der Genauigkeit der Aufgabe und der subjektiven Bewertung der Natürlichkeit durch die Benutzer, Aufgrund der Leichtigkeit des Lernens und der Leichtigkeit des Gehens stellten sie fest, dass echtes Gehen das Gehen an Ort und Stelle, das Armschwingen und andere naturnahe Fortbewegungstechniken übertraf. Reales Gehen ist zwar die natürlichste und eindringlichste Fortbewegungstechnik mit einem hohen subjektiven Präsenzgefühl (Slater et al., 1995), erfordert jedoch zu viel Platz, den die meisten physischen Umgebungen nicht bieten, und beschränkt daher virtuelle Umgebungen auf die Größe des verfolgten Raumes. Wenn die virtuelle Umgebung größer als die physische Umgebung ist, reicht reales Gehen nicht aus, um die virtuelle Umgebung zu erkunden, und verliert den größten Teil ihres Interesses. Obwohl es sich um die natürlichste und immersivste Fortbewegungstechnik mit einem hohen subjektiven Präsenzgefühl handelt (Slater et al., 1995), benötigt sie zu viel Platz, den die meisten physischen Umgebungen nicht bieten, und beschränkt somit virtuelle Umgebungen auf die Größe des verfolgten Raums. Wenn die virtuelle Umgebung größer als die physische Umgebung ist, reicht reales Gehen nicht aus, um die virtuelle Umgebung zu erkunden, und verliert den größten Teil ihres Interesses. Obwohl die natürlichste und immersivste Fortbewegungstechnik mit einem hohen subjektiven Präsenzgefühl (Slater et al., 1995), benötigt sie zu viel Platz, Eine andere übliche lehnungsbasierte Fortbewegungstechnik, die die Kopfbewegungserfassung verwenden kann, ist der Walking-in-Place. Diese Methode imitiert das Gehen. Es ermutigt die Benutzer, ihren gesamten Körper so weit wie möglich in eine realistische Gehbewegung einzubeziehen, ohne sich jedoch tatsächlich vorwärts zu bewegen. Viele Studien wurden durchgeführt, um diese Methode mit anderen Fortbewegungsmethoden zu vergleichen (Bozgeyikli et al., 2016b, 2016a; McCullough et al., 2015) oder sogar neue Varianten dieser Methode unter Verwendung verschiedener Gesteineingaben vorschlagen (Berger & Wolf, 2018; Nilsson et al., 2013). Die Ergebnisse der Studien, die diese Fortbewegungstechnik mit anderen Methoden vergleichen, wie z

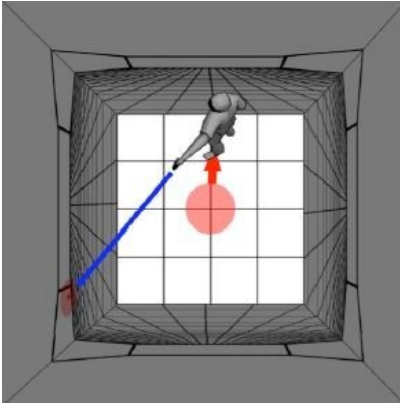


Wie Armschwingen, Zeigen und Teleportieren, zeigten lehnbasierte Methoden in sitzender Position, Joystick usw., dass Walking-in-Place die meisten dieser Techniken übertrifft. Durch Walking-in-Place kann der Platzbedarf für die Bewegung durch die virtuelle Umgebung mit weniger Simulatorkrankheit verringert werden. Es weist jedoch einige Schwachstellen und Grenzen auf. Die erste Einschränkung betrifft die Tatsache, dass in vielen Fällen viele Sensoren am Körper des Benutzers angebracht werden müssen. Einige Studien versuchten, diese Probleme zu lösen, indem sie andere Parameter verwendeten, um das Gehen wie die Position und Ausrichtung des am Kopf montierten Displays zu erfassen (siehe Abbildung 4). Darüber hinaus ist der Immersionsgrad des Benutzers immer noch niedrig (Lee et al., 2018; Nilsson et al., 2013). Darüber hinaus ist eine stehende Position nicht immer geeignet, um die virtuelle Umgebung zu erkunden. Die zweite Einschränkung besteht darin, dass diese Technik möglicherweise keine geeignete Lösung für die Erkundung einer erheblich großen virtuellen Umgebung ist, da sie viel Zeit und physische Energie in Anspruch nehmen würde. Daher kann es anstrengend sein, vor Ort zu Fuß zu gehen, um eine Stadt zu erkunden. Der Schwachpunkt besteht darin, dass der Immersionsgrad der Benutzer aufgrund der Tatsache, dass die Benutzer das Gehen ohne tatsächliches Gehen imitieren, und der Schwierigkeit der erforderlichen Gesten verringert wird.



**Abbildung 4. Walking-in-Place-Technik unter Verwendung der HMD-Position und -Orientierung (von Lee et al., 2018)**

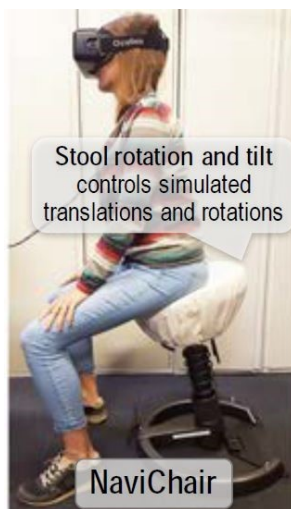
Zielasko und Kollegen (2016) verwendeten die im HMD eingebauten Trägheitssensoren, um die Position und die Drehung des sitzenden Benutzers zu bestimmen. Der Teilnehmer musste nach oben und unten schauen, um vorwärts und rückwärts zu gehen. Die Ergebnisse zeigten, dass der Joystick eine Outperformance aufwies und ein besseres Ranking aufwies als die auf Kopfbewegungen basierende Fortbewegungstechnik. Es ist erwähnenswert, dass die Verwendung der Kopfbewegung zum Navigieren und Drehen in der virtuellen Umgebung die Verwendung des Kopfes für andere Interaktionen opfert, wie zum Beispiel das Umsehen in 360°, ohne sich tatsächlich zu drehen. McMahan und Kollegen (2012) schlugen verschiedene Ansätze derselben Fortbewegungstechnik in einer Höhlendarstellungskonfiguration vor. Sie entwarfen und implementierten eine neue High-Fidelity-Fortbewegungstechnik, die auf der Kopfpositionsverfolgung basiert, die sie Human Joystick nannten, und verglichen sie mit der Joystick-Navigation. Indem Sie den horizontalen 2D-Vektor von der Mitte der CAVE bis zur Position des verfolgten Kopfes des Benutzers erfassen und ihn als 2D-Vektor eines Joysticks verwenden, der für die Fortbewegung unabhängig von der Blickrichtung des Benutzers verwendet wird (siehe Abbildung 5). Sie fanden heraus, dass die Teilnehmer mit der Human Joystick-Methode, die an eine High-Fidelity-Anzeige gekoppelt war, ein größeres Gefühl der Präsenz hatten. Bei der Anzeige mit niedriger Wiedergabetreue übertrafen Tastatur und Maus jedoch die Human Joystick-Technik.



**Abbildung 5. Fortbewegungstechnik "Human Joystick" (von McMahan et al., 2012)**

### Trunk-basierte Motion Capture LT

Die auf der Erfassung der Rumpfbewegung basierenden Techniken bestehen darin, den Rumpf physisch zu lehnen oder zu kippen, um nach zwei Freiheitsgraden (vorwärts und rückwärts) zu übersetzen und den Benutzer im virtuellen Raum zu drehen (Kitson et al., 2017b).



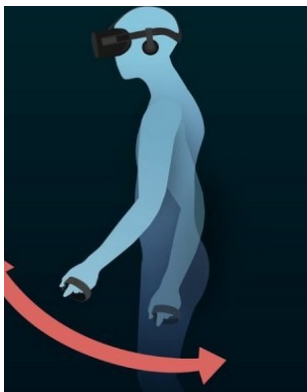
**Abbildung 6. NaviChair: Ein Beispiel für eine Fortbewegungstechnik basierend auf der Rumpfbewegung des Benutzers in sitzender Position (von Kitson et al., 2017b).**

Mit der Trunk-basierten Methode können Benutzer im Stehen durch die virtuelle Umgebung gehen. Harris und Kollegen (2014) verglichen diese Methode mit der Joystick-Navigation und der Walking-in-Place-Fortbewegungstechnik. Im ersten Teil der Studie verglichen sie diese Fortbewegungstechnik mit der Joystick-Navigation. Sie fanden heraus, dass die räumliche Darstellung der virtuellen Umgebung genauer ist, wenn die Teilnehmer die Umgebung erkunden, indem sie sich physisch anlehnen. Im zweiten Teil der Studie stellten sie fest, dass Benutzer orientierter waren, wenn sie sich zur Erkundung der Umgebung beugten, während sie mehr Zeit und physische Energie aufwenden, um die virtuelle Umgebung mit der Walking-in-Place-Technik zu erkunden. Außerdem äußerte der Teilnehmer, dass die schnellere Geschwindigkeit mit der Lehnmethode kongruenter sei als mit Walking-in-Place. Jedoch, Im räumlichen Wissenstest waren Drehfehler und die Latenz des Abbiegens in der Konfiguration der Walking-in-Place-Technik geringer. Darüber hinaus kann sich LT auf Rumpfneigung auch in sitzender Position befinden (Kitson et al., 2017a, 2015; Zielasko et al., 2016). In ihrer Studie verwendeten Kitson und Kollegen (2017a) eine komplexe Umgebung, um vier auf Neigung basierende Fortbewegungstechniken mit dem Joystick in einer Zielfindungsaufgabe zu vergleichen. Die Vergleiche basierten auf Interviews und Beobachtungen sowie auf Daten, die während der Experimente gesammelt wurden. Die Ergebnisse unterstützten das nicht Kitson und Kollegen (2017a) verwendeten eine komplexe Umgebung, um vier auf Neigung basierende Fortbewegungstechniken mit dem Joystick in einer Zielfindungsaufgabe zu vergleichen. Die Vergleiche basierten auf Interviews und Beobachtungen sowie auf Daten, die während der Experimente gesammelt wurden. Die Ergebnisse unterstützten das nicht Kitson und Kollegen (2017a) verwendeten eine komplexe Umgebung, um vier auf Neigung basierende Fortbewegungstechniken mit dem Joystick in einer Zielfindungsaufgabe zu vergl

Vorhersagen der Literatur, dass die Motion-Cueing-Schnittstellen gegenüber einer Nicht-Motion-Cueing-Schnittstelle wie dem Joystick größere Vorteile für Illusionen von Selbstbewegung, räumlicher Wahrnehmung und Orientierung, Genuss und Engagement sowie Eintauchen und Präsenz bieten. Das qualitative Feedback zeigte, dass die Joystick-Navigation eine einfachere und präzisere Steuerung bietet, komfortabler ist und den Teilnehmern hilft, sich räumlich orientierter zu fühlen, obwohl wir bei der Verwendung des Joysticks zum Bewegen den Einsatz von Arm und Hand in der Interaktion opfern mit dem virtuellen System. Die vier Motion-Cueing-Techniken zeigten jedoch einen Trend zu einem stärkeren Gefühl der Selbstbewegung. In ihrer Studie Zielasko und Kollegen (2016) testeten eine kostengünstige Freisprech-Navigationsmethode in sitzender Position und verglichen sie mit einer Gamepad-Navigation in einer virtuellen Umgebung mit am Kopf montiertem Display. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass die Lehnmethode im Allgemeinen sehr gut funktioniert und auf verschiedenen Ebenen mit der Gamepad-Navigation konkurrieren kann.

#### **Armbasierte Bewegungserfassung LT**

Benutzer können auch ihren Arm verwenden, um durch die virtuelle Umgebung zu gehen. Eine der ersten Methoden, bei denen der menschliche Arm zur Steuerung der Benutzerbewegungen verwendet wird, sind die „Arm Swinging“-Methoden (Habgood et al., 2018; McCullough et al., 2015). Die Grundidee der Methode besteht darin, dass Benutzer ihre Arme schwingen, um sich in die Blickrichtung zu bewegen (siehe Abbildung 7). Um mit dieser Technik durch die virtuelle Umgebung zu gehen, müssen Position und Drehung der Hand des Benutzers mithilfe von Verfolgungsgeräten verfolgt werden. Diese Tracking-Systeme sind jedoch teuer und sehr spezifisch und legen nahe, dass es sich niemals um ein Produkt auf Warenebene handelt (McCullough et al., 2015). In mehreren Studien wurde versucht, das Problem der Sensoren mithilfe eines tragbaren Armbands (Beschleunigersensoren) zu lösen, das am dicksten Teil des Unterarms des Benutzers angebracht wird: dem Myo-Armband. Diese Fortbewegungstechnik wurde zum ersten Mal von McCullough und Kollegen (2015) vorgeschlagen, die sie mit Joystick- und Walking-in-Place-Ansätzen verglichen. Sie fanden heraus, dass diese neue Armschwingmethode den einfachen Joystick in räumlicher Ausrichtung übertrifft und mit dem physischen Gehen zu Fuß vergleichbar ist. In ihrer Studie verglichen Wilson und Kollegen (2016) die auf Myo-Armbinden basierende Arm Swinging-Fortbewegungstechnik mit einer neuen Methode des In-Place-Gehens, die auch auf der Myo-Armbinde und dem tatsächlichen Gehen basiert. Die Ergebnisse zeigten, dass die körperliche Fortbewegung sowohl das Gehen an Ort und Stelle als auch das Armschwingen hinsichtlich des räumlichen Bewusstseins übertraf. Sie zeigten auch, dass die Walking-in-Place-Methode besser war als das Armschwingen. Sie fanden heraus, dass diese neue Armschwingmethode den einfachen Joystick in räumlicher Ausrichtung übertrifft und mit dem physischen Gehen zu Fuß vergleichbar ist. In ihrer Studie verglichen Wilson und Kollegen (2016) die auf Myo-Armbinden basierende Arm Swinging-Fortbewegungstechnik mit einer neuen Methode des In-Place-Gehens, die auch auf der Myo-Armbinde und dem tatsächlichen Gehen basiert. Die Ergebnisse zeigten, dass die körperliche Fortbewegung sowohl das Gehen an Ort und Stelle als auch das Armschwingen hinsichtlich des räumlichen B



**Abbildung 7. Armschwing-Fortbewegungstechnik: Schwingen Sie Ihren Arm, um die Bewegung in der virtuellen Umgebung zu steuern**

Eine andere Möglichkeit, in der virtuellen Realität basierend auf dem Arm des Benutzers zu reisen, um die Bewegungen in der virtuellen Umgebung zu steuern, ist eine Methode, die als „Punkt- und Teleport-Technik“ bezeichnet wird (im Gegensatz zur automatisierten Software-Teleportation). Mit dieser Technik können Benutzer von einem Ort zum anderen reisen, indem sie auf den Ort zeigen, zu dem sie gehen möchten, und sich dann an der neuen Position befinden (siehe Abbildung 8). Der neue Ort, an den Benutzer reisen möchten, wird häufig als „Zielort“ bezeichnet (Bozgeyikli et al., 2019). In einigen Anwendungen sind Zielorte vordefiniert, und der Benutzer muss auf das Ziel zeigen, um anzugeben, zu welchem Ziel er reisen möchte. In anderen Anwendungen können sich die Benutzer nicht vordefinieren, sondern überall auf dem Boden teleportieren, indem sie auf die Zielposition zeigen. Im

In beiden Fällen erhalten Benutzer häufig ein visuelles und manchmal ein akustisches Feedback, um den ausgewählten Zielort und die Bewegung des Benutzers zu bestätigen (Cherep et al., 2020). Beim Zeigen auf die Zielposition kann die Teleportation entweder durch Drücken einer Taste oder durch längeres Zeigen des Ziels als eine bestimmte Zeitspanne ausgeführt werden. In diesem Fall ist es wichtig zu beachten, dass die Verwendung des Arms zur Interaktion mit dem VE „geopfert“ wird. Darüber hinaus ist bekannt, dass die Punkt- und Teleport-Fortbewegungstechnik keine Reisekrankheit verursacht, da sie keine sichtbare Translationsbewegung beinhaltet (Bozgeyikli et al., 2019). In ihrer Studie verglichen Bozgeyikli und Kollegen (2016b) diese Fortbewegungsmethode mit den Walking-in-Place- und Joystick-gesteuerten Techniken. Um sich in der virtuellen Umgebung zu teleportieren, sollten Benutzer zwei Sekunden lang auf denselben Ort zeigen. Danach wird die Teleportation ausgelöst und der virtuelle Avatar sofort an die Zielposition gebracht. In den Experimenten müssen die Benutzer mit jeder Fortbewegungstechnik zu zehn Zielpunkten gehen, ohne mit statischen Hindernissen zusammenzustößen. Sie fanden heraus, dass die „Point and Teleport“-Methode die Walking-in-Place- und Joystick-gesteuerten Techniken übertraf. Benutzer erreichten die Ziele schneller und führten weniger Kollisionen mit den Hindernissen durch. Die Joystick-Methode ist jedoch einfacher zu verstehen, erfordert weniger Aufwand, führt zu weniger Müdigkeit und die Benutzer hatten eine bessere Kontrolle über die Aufgabe. Es ist wichtig zu beachten, dass bei dieser Technik die Haltung des Benutzers durch die abgesenkte Armhaltung des Benutzers inaktiv wird. Folglich, Dieses Design eignet sich möglicherweise nicht für Anwendungen, bei denen der Benutzer während des Wartens einige Aktivitäten mit den Händen ausführen soll. In diesem Fall muss eine andere Geste oder ein Controller verwendet werden, um die Aktivität der Teleportation zu steuern.



**Abbildung 8. Punkt- und Teleport-Fortbewegungstechnik basierend auf den Armbewegungen des Benutzers (von Bozgeyikli et al., 2016b)**

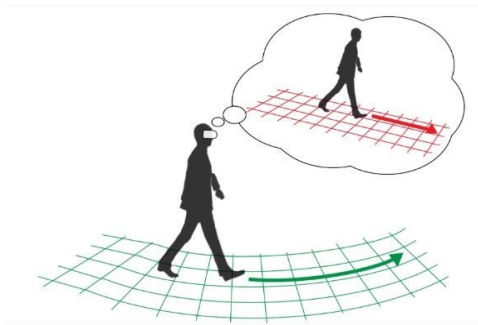
Obwohl die positiven Rückmeldungen der Benutzer bezüglich der lehnbasierten Fortbewegungstechnik, zeigten die meisten Vergleichsstudien, dass gängige Methoden wie der Joystick die lehnbasierten Techniken übertreffen. Außerdem können sich die Teilnehmer im Fall einer auf Kopfverfolgung basierenden Bewegung nicht gleichzeitig bewegen und umschaun. Bei armbasierten Methoden können die Benutzer ihre Hände nicht frei verwenden, um mit der virtuellen Umgebung zu interagieren. Ähnlich wie bei den stammbasierten Fortbewegungstechniken ist die Bewegung des Rumpfes eingeschränkt, da sie als Befehle zum Vorwärts- oder Rückwärtsbewegen interpretiert werden können.

#### 4.2.2.Walk Simulation LT

Um die Vorteile des realen Gehens zu erfassen und gleichzeitig die mögliche Größe der virtuellen Umgebung zu erweitern, wurde in mehreren Studien die Fortbewegungstechnik des umgeleiteten Gehens verwendet. Das umgeleitete Gehen ist eine Technik, mit der Benutzer wie mit den Walking-in-Place-Methoden eine virtuelle Welt erkunden können, die erheblich größer ist als der verfolgte Arbeitsbereich, um die Begrenzung der Größe der virtuellen Umgebung zu berücksichtigen (Zank & Kunz, 2015). Diese Technik funktioniert durch interaktives Drehen der virtuellen Szene um den Benutzer, so dass der Benutzer kontinuierlich auf die am weitesten entfernte "Wand" des Verfolgungsbereichs zugehen muss (siehe Abbildung)

9). Daher werden Benutzer unbemerkt auf einem physischen Pfad geführt, der sich von dem Pfad unterscheidet, den der Benutzer in der virtuellen Welt wahrnimmt, indem er die Transformationen von realen zu virtuellen Bewegungen manipuliert (Bruder et al., 2015). Wenn der Benutzer beispielsweise die Ansicht im HMD bei jedem Schritt virtuell zur Seite dreht, wird dies unwissentlich kompensiert, indem er einen Kreisbogen in die entgegengesetzte Richtung geht, während er die Illusion von hat

Gehen auf einer geraden Bahn (Nabiyouni et al., 2015). Diese Fortbewegungstechnik nutzt die Grenzen menschlicher Wahrnehmungsmechanismen zum Erfassen von Position, Orientierung und Bewegung, was darauf hindeutet, dass der Benutzer diese Rotation nicht bemerkt (Razzaque, 2005).



**Abbildung 9. Umgeleitetes Gehen:** Gehen in der realen Welt auf einem gekrümmten Pfad mit einem visuell wahrgenommenen geraden Pfad in der virtuellen Welt (von Matsumoto et al., 2016)

Das mit diesem Ansatz verbundene Problem besteht darin, dass das menschliche Wahrnehmungssystem ein gewisses Maß an Inkonsistenz zwischen propriozeptivem, vestibulärem und visuellem Empfinden in einer virtuellen Umgebung toleriert. Mehrere Studien haben gezeigt, dass Benutzer keine Inkonsistenz erkennen können, wenn ihr physischer Pfad bei virtuellen Bewegungen mit einem Radius von mindestens 22 Metern gebogen wird. Wenn umgeleitetes Gehen in einem kleineren Arbeitsbereich angewendet wird, werden Manipulationen spürbar, die das Gefühl der Anwesenheit des Benutzers erheblich verringern (Bruder et al., 2013; Steinicke et al., 2010). Ab einem bestimmten Radius ist diese Technik dann nicht geeignet.

### 4.3. Externe Peripherie zentriert

In verschiedenen Studien wurde der menschliche Körper als Fortbewegungsinstrument zur Erforschung der virtuellen Umgebung verwendet, während in mehreren Studien nicht an die körperzentrierten Selbstbewegungshinweise geglaubt wurde, sondern versucht wurde, sich mithilfe externer Peripheriegeräte auf effektive und intuitive Fortbewegungstechniken zu konzentrieren. Die Fortbewegungstechniken, die zu dieser Kategorie gehören, können in zwei Hauptunterkategorien unterteilt werden: "naturnahe" und "nichtnatürliche" Methoden.

#### 4.3.1. Semi-natural LT

Beim naturnahen Ansatz ist es das Ziel, so nah wie möglich am realen Weg zu sein. In ihrer Studie führten Nabiyouni und Kollegen (2015) ein Experiment durch, um das reale Gehen mit einer naturnahen Fortbewegungstechnik und einer traditionellen nichtnatürlichen Technik zu vergleichen, die auf einem Gamecontroller basiert. Die naturnahe Fortbewegungstechnik basierte auf dem Virtosphere-Gerät, einer großen Hohlkugel, die auf Rollen montiert ist und in der ein Benutzer, der ein am Kopf montiertes Display trägt, in jede Richtung gehen kann, um sich durch eine virtuelle Umgebung jeder Größe zu bewegen (siehe Abbildung) 10). Die Ergebnisse zeigten, dass die Virtosphere sowohl vom Gamepad als auch von den realen Laufflächen deutlich übertroffen wurde, was darauf hinweist, dass sie langsamer, weniger präzise, schwerer zu bedienen, ermüdender und schwieriger zu kontrollieren ist.



**Abbildung 10. Das Virtusphere-Fortbewegungsgerät.**

Eine neue naturnahe Fortbewegungstechnik ist das omnidirektionale Laufband (Calandra et al., 2018; Warren & Bowman, 2017). Das omnidirektionale Laufband ist ein mechanisches Gerät, mit dem der Benutzer eine Bewegung der Lokomotive in jede Richtung ausführen kann, wobei eine Bewegung von 360 Grad möglich ist (siehe Abbildung 11). In Kombination mit einem am virtuellen Kopf montierten Display wird dieses Gerät verwendet, um die Fußbewegungen des Benutzers zu erfassen und sein Verhalten in einer virtuellen Welt über einen Avatar zu reproduzieren (Calandra et al., 2018). Einige Fortbewegungstechniken verwenden spezielle Geräte, um die Fortbewegung zu steuern und die Benutzer an einem sicheren Ort zu halten. Zu diesem Zweck wurden omnidirektionale Laufbänder entworfen und entwickelt. Diese Laufbänder spüren das Gehen in jede Richtung und halten den Benutzer in der Mitte.

In ihrer Studie verglichen Warren und Bowman (2017) das omnidirektionale Laufband Virtuix mit einem klassischen Gamecontroller in einer Pfadverfolgungsaufgabe in einer virtuellen Umgebung. Sie fanden heraus, dass der Gamecontroller eine bessere Benutzererfahrung bietet als der Omni Virtuix. Das omnidirektionale Laufband ist natürlicher und verspielter, erfordert jedoch das Tragen eines unbequemen Gurtzeugs und hat Schwierigkeiten beim Drehen beim Gehen, was bereits nach einer kurzen Benutzungssitzung zu Müdigkeit führt. Das erhaltene Ergebnis stützt frühere Studien, die zeigen, dass Realismus in Virtual-Reality-Systemen nicht immer die am besten angepasste Lösung ist.

In ihrer Studie haben Calandra und Kollegen (2018) eine vergleichende Studie zwischen zwei Fortbewegungstechniken durchgeführt: einem Fortbewegungslaufband, das Bewegungen in alle Richtungen unterstützt, und Armschwingen, das Bewegungen vom Hin- und Herschwingen des Benutzers erkennt. Die Ergebnisse zeigten, dass die beiden Methoden in Bezug auf Usability-Faktoren wie Funktionalität, Benutzerinteraktion mit Objekten, Simulationstreue, Anwesenheits- und Reisekrankheitssymptome als größtenteils gleichwertig angesehen wurden, jedoch mit einem leichten Vorteil für die Arm Swinging-Methode.



Omnidirektionale Laufbänder gelten im Vergleich zu der Art und Weise, wie wir uns durch den physischen Raum bewegen, als am ähnlichsten. Sie sind jedoch teuer und schwierig zu verwenden und zu warten. Außerdem impliziert eine solche Fortbewegungstechnik eine proportionale Zeit und Energie und kann für den Benutzer in einer großen Umgebung kostspielig sein und muss im experimentellen Protokoll berücksichtigt werden (Calandra et al., 2018; Warren & Bowman, 2017). Dennoch wurden in den letzten zwei Jahren mehrere andere omnidirektionale Laufbänder auf den Markt gebracht, und es ist derzeit keine Literatur verfügbar, die ihre Leistung bewertet, und neue spezifische Studien könnten diese Ergebnisse für eine aktuellere Überprüfung nuancieren. Aus diesen Gründen,

#### 4.3.2. Nicht natürliche LT

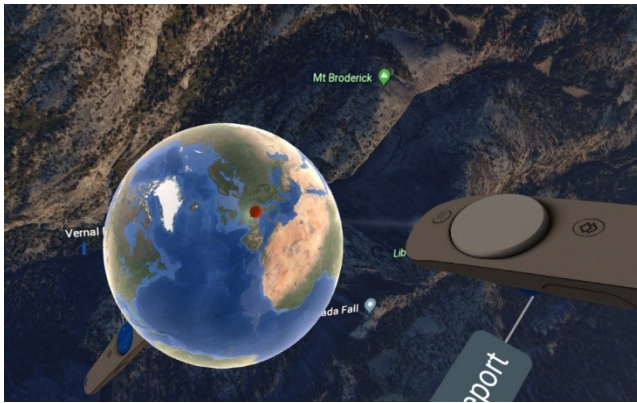
Eine der am häufigsten verwendeten Methoden, um auf nicht natürliche Weise durch die virtuelle Umgebung zu gehen, ist die Teleportation. Es wird zu einem der bekanntesten Mittel der VR-Interaktion, da es eine minimale Reisekrankheit und hervorruft, dass dem Benutzer eine effiziente Möglichkeit, sich in virtuellen Räumen zu bewegen, die größer als der verfolgte physische Bereich sind (Riecke et al., 2018).

Habgood und Kollegen (2018) verglichen die Punkt- und Teleport-Fortbewegungstechnik mit dem kontinuierlichen Gehen unter Verwendung einer klassischen Gamepad-Methode und mit neuen Variationen der Punkt- und Teleport-Methode, die auf einer schnellen und kontinuierlichen Bewegung des Benutzers zwischen vordefinierten Knotenpositionen in der virtuellen Umgebung basieren. Die Ergebnisse zeigten, dass die Teleportationstechnik die kontinuierlichen Gehansätze übertraf. Sie zeigten auch, dass die schnellen Bewegungsgeschwindigkeiten das Gefühl der Reisekrankheit der Spieler im Vergleich zu kontinuierlichen Bewegungen bei normalen Gehgeschwindigkeiten verringern. Die Studie konnte jedoch keine Vorteile dieser neuen Variante der Teleportation gegenüber der klassischen Teleportation in Bezug auf das Präsenzgefühl des Benutzers nachweisen. Dies reduziert jedoch die Anzahl der Kollisionen erheblich, da die Positionen und Übergänge, die der Benutzer einnehmen kann, begrenzt werden.

Die Verwendung von „Point and Teleport“ LT ist eine effiziente Methode, um sich mit geringer Reisekrankheit durch die virtuelle Umgebung zu bewegen. Dennoch kann es zu einem neuen Problem kommen, das durch den desorientierenden Effekt einer Positionsänderung ohne Bewegungskontinuität verursacht wird. Somit stört es das Raumgefühl eines Benutzers und verringert die Anwesenheit und das Eintauchen (Bowman et al., 1997).

In ihrer Studie stellten Berger und Wolf (2018) eine neue Fortbewegungstechnik vor, die sie World-InMiniature nannten. Mit dieser Technik kann der Benutzer seinen Standpunkt ändern, indem er sein repräsentatives Symbol in einer virtuellen Miniaturreplik der virtuellen Umgebung, in der er sich befindet, auswählt und verschiebt (siehe Abbildung 12). Eine Bewertung wurde durchgeführt, um diese Fortbewegungstechnik mit handgestenbasierten Teleportations- und kontinuierlichen Gehansätzen unter Verwendung des Joysticks des Oculus Touch-Controllers zu vergleichen. Sie fanden heraus, dass World-InMiniature die beiden anderen Techniken in der Navigationszeit für größere Entfernungen übertrifft. Darüber hinaus bietet es bestes räumliches Wissen und verursacht unter den verglichenen Methoden die geringste Reisekrankheit. Jedoch,





**Abbildung 12. World-In-Miniature-Fortbewegungstechnik in Google Earth VR**

#### **4.4. LT kombiniert die Verwendung des Körpers und der äußeren Peripherie**

Einige Studien ergaben eine bessere Leistung, indem sie die Neigung des Körpers des Benutzers und die Verwendung eines externen Peripheriegeräts kombinierten. In ihrer Studie kombinierten Kruijff und Kollegen (2015) die Rumpfneigung und den Joystick, um die Bewegung in der virtuellen Umgebung zu steuern. Sie konzentrierten sich auf die Auswirkungen der statischen und dynamischen Neigung des Oberkörpers in Kombination mit dem Joystick auf die wahrgenommenen zurückgelegten Entfernungen und die Wahrnehmung von Selbstbewegungen in der virtuellen Umgebung. Sie fanden heraus, dass sich das Lehnen des Kofferraums während der Fahrt mit dem Joystick in der virtuellen Umgebung positiv auf die Selbstbewegungswahrnehmung auswirkte. Die gefundenen Ergebnisse bestätigen frühere Arbeiten von Riecke und Kollegen (2010), die fanden, dass die Steuerung von Übersetzungen über Joystick und Rotationen über physische Rotationen zu einer besseren Leistung führte als die Joystick-Navigation. und ergab eine nahezu vergleichbare Leistung wie das tatsächliche Gehen in Bezug auf Sucheizienz und Zeit bei Navigationssuchaufgaben. In ihrer Studie schlugen Ohshima und Kollegen (2016) eine neue Variante des Walking-in-Place-Ansatzes vor, die mit der von ihnen genannten Kopfbewegung kombiniert wurde: die virtuelle intuitive Einheit. Bei diesem Ansatz, der sich auf einem Stuhl befindet, kann der Benutzer durch die virtuelle Umgebung gehen, indem er seine Beine auf und ab bewegt. Der Unterschied zum klassischen Walking-in-Place-Ansatz besteht darin, dass anstelle der Platzierung von Sensoren am Körper des Benutzers ein Drucksensormodul verwendet wurde, das unter seinem Oberschenkel auf dem Boden platziert wurde. Diese Methode kann eine Lösung für viele Probleme des Walking-in-Place-Ansatzes sein. Trotzdem leidet es an zwei Hauptproblemen. Das erste Problem ist das hohe Maß an Reisekrankheit, das den Walking-in-Place-Ansatz im Allgemeinen auslöst. Das zweite Problem ist die Art und Weise, wie die Benutzer Rotationen in der virtuellen Umgebung steuern: Der Benutzer muss die Kopfdrehung verwenden, um sowohl das Umsehen als auch die Drehung beim Gehen zu steuern. Bozgeyikli und Kollegen (2016a) nutzten eine Schrittmachine, um die virtuelle Umgebung zu erkunden, die mit Kopfbewegungen kombiniert ist. Die Bewegung der Schrittmachine wurde durch ein optisches Bewegungsverfolgungssystem unter Verwendung eines reflektierenden Markers verfolgt. Die Schrittbewegung auf der Maschine wurde als Fortbewegung unter Verwendung eines am Pedal angebrachten Markers in die virtuelle Welt übertragen. Eine Vergleichsstudie wurde zwischen der Schrittmachine und anderen Fortbewegungstechniken durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass die Schrittmachine, obwohl sie durch Joystick-, Punkt- und Teleporttechniken übertroffen wurde, hohe Punktzahlen in Bezug auf Komfort, Genuss und Steuerungspräzision erhielt.

## **5. Bewertung der Fortbewegungstechniken**

Die Extraktion und Analyse der Fortbewegungstechniken in den besprochenen Arbeiten veranlasste uns, eine Bewertung und einen Vergleich zwischen den 22 identifizierten Fortbewegungstechniken vorzuschlagen.

Tabelle 2 stellt den vorgeschlagenen Vergleich dar, den wir basierend auf dem häufigsten Kriterium für die Ration der virtuellen Realität durchgeführt haben, das wir in den überprüften Papieren identifiziert haben. Die relevanten ausgewählten Kriterien sind: das Vorhandensein in der virtuellen Umgebung (dh das Eintauchen), die Benutzerfreundlichkeit, die Steuergenauigkeit, die räumliche Ausrichtung, das Selbstbewegungsgefühl (dh das Gefühl, die Bewegung zu steuern), die Müdigkeit, die Reisekrankheit, die



Anpassung für große virtuelle Umgebungen und Anpassung für die Interaktion mit der virtuellen Realität. Die angegebenen Bewertungen waren von "-" bis "+". Die schlechteste Punktzahl "-" bedeutet, dass das angegebene Vergleichskriterium überhaupt nicht erfüllt ist, während die beste Punktzahl "+" bedeutet, dass das Vergleichskriterium vollständig erfüllt ist. Beispielsweise wurde im Kriterium „Benutzerfreundlichkeit“ die Bewertung „++“ der realen Laufbewegungstechnik zugewiesen. Diese Technik erfordert jedoch zu viel Platz, den die meisten physischen Umgebungen nicht bieten. Aus diesem Grund wurde ihm im Kriterium „Anpassung für große VE“ die Punktzahl „-“ zugewiesen.

Tabelle 2. Vergleichstabelle zwischen den verschiedenen Fortbewegungstechniken, die in den besprochenen Papieren identifiziert wurden

	Präsenz in der VE	Benutzerfreundlichkeit	Präzision steuern	Räumliche Orientierung	Empfindungen Selbstbewegung	Müdigkeit	Bewegungskrankheit	VE-Anpassung für große virtuelle Umgebungen	Anpassung an VR Interaktionen
Echter Spaziergang	++	++	++	+	+	++	++	+	+
LazyNav	+	--	--	+	+	+	--	+	+
Arm schwingen	++	+	--	+	+	--	--	--	--
An Ort und Stelle gehen	+	++	+	+	+	--	--	--	--
Teleportieren (Hand Gesten)	++	+	++	--	--	++	++	++	--
Menschlicher Joystick	+	--	+	+	--	+	--	+	+
Körper gelehnt (Standposition)	+	+	--	+	+	+	--	+	--
MuvMan	+	--	--	+	+	+	--	+	--
Den Kopf schütteln	--	--	--	+	+	+	--	+	--
NaviChair	+	--	--	+	+	+	--	+	--
Schwenken	+	--	--	+	+	+	--	+	--
Umgeleitetes Gehen	--	+	--	+	+	--	++	+	+
Intuitives Schreiten Einheit	+	+	--	+	+	+	--	+	--
Körper lehnen + Joystick	+	--	+	+	+	+	--	+	--
Virtusphäre	+	--	--	+	+	--	+	+	+
VibroSkate	+	--	--	+	--	+	--	+	+
Schrittmachine	+	--	+	+	+	--	--	+	--
Omnidirektional Laufband	++	--	+	+	++	--	+	+	++
Joystick	+	++	++	++	--	++	--	++	--
Teleportieren (HMD Controller)	++	++	++	--	--	++	++	++	+
Gaspedal	+	--	--	+	--	--	--	+	+
World-In-Miniatur	+	--	--	+	--	+	+	+	+

Die obige Tabelle zeigt eine erste Synthese und Bewertung der Fortbewegungstechniken in den überprüften Studien. Dieser Satz hätte jedoch seine Grenzen, da nicht alle Techniken miteinander verglichen wurden. Aber es würde eine globale Vision und eine aktuelle Bewertung bieten, die auf unserer ersten Vergleichsstudie basiert. Eine weitere Grenze dieser Bewertung besteht darin, dass einige der identifizierten Fortbewegungstechniken, wie beispielsweise die omnidirektionalen Laufbänder, neu entwickelt wurden und sich ständig weiterentwickeln. Es gibt daher Hinweise darauf, dass die Vor- und Nachteile nicht ein für alle Mal behoben werden können.

Ein weiterer Gesichtspunkt, der bei der Auswahl der Fortbewegungstechnik für ein Experiment hilfreich wäre, ist die Fähigkeit, ein Körperteil auf seine natürlichen Bewegungen hin zu verfolgen. Bei mehreren in diesem Artikel vorgestellten Systemen werden Körperteile auf nicht natürliche Weise verwendet und können daher nicht zur Interaktion in der Szene oder zur Aufzeichnung als natürliches Verhalten des Teilnehmers verwendet werden. In Tabelle 3 beziehen sich die Systemspezifikationen auf Körperteile in vier Kategorien: neutral, natürlich, eingeschränkt und geopfert. Die neutrale Kategorie (das graue Kästchen in Tabelle 3) gilt für Systeme, an denen das Körperteil nicht beteiligt ist. Diese Teile werden dann nicht überwacht. Die natürliche Kategorie (das grüne Kästchen in Tabelle 3) bezieht sich auf Systeme, die die Körperteile auf natürliche Weise verfolgen und so wie sie sind ein Feedback geben. Die eingeschränkte Kategorie (das gelbe Kästchen in Tabelle 3) gilt für Systeme, die Körperteile verfolgen, deren Wechselwirkungen jedoch einschränken (z. B. VibroSkate). Die geopfert Kategorie gilt für diejenigen, die Körperteile auf nicht natürliche Weise verwenden und verhindern, dass sie für Interaktionen in der Szene verwendet werden. Wenn das System nicht vom Körperteil abhängt, wurde es als optional gekennzeichnet (blau in der Tabelle). Zum Beispiel ist die Armschwungtechnik nicht mit einem Experiment kompatibel, bei dem die Bewegungen der Unterarme auf einem Drumkit gemessen werden sollen. Sie werden dann als geopfert gekennzeichnet, da dieser Körperteil auf nicht natürliche Weise der Fortbewegung gewidmet ist. Im Gegensatz dazu wird bei der umgeleiteten Gehteknik der Kopf auf natürliche Weise überwacht, und sein Signal kann verwendet werden, um diesen Körperteil als natürlich aufzuzeichnen.

**Tabelle 3. Körperteile für Fortbewegungstechniken**

	Head	Trunk	Forearms	Hands	Legs	Feet
Real walk	Natural	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral
LazyNav	Sacrificed	Sacrificed	Neutral	Neutral	Neutral	Sacrificed
Arm Swinging	Optional	Neutral	Sacrificed	Sacrificed	Neutral	Neutral
Walking-In-Place	Optional	Neutral	Neutral	Neutral	Sacrificed	Sacrificed
Teleporting (Hand Gestures)	Natural	Neutral	Sacrificed	Sacrificed	Neutral	Neutral
Human Joystick	Neutral	Neutral	Sacrificed	Sacrificed	Neutral	Neutral
Body leaning (Stand position)	Neutral	Sacrificed	Neutral	Neutral	Sacrificed	Sacrificed
MuvMan	Neutral	Sacrificed	Neutral	Neutral	Sacrificed	Sacrificed
Shake your head	Sacrificed	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral
NaviChair	Neutral	Sacrificed	Neutral	Neutral	Sacrificed	Sacrificed
Swivel Chair	Neutral	Constrained	Neutral	Sacrificed	Sacrificed	Sacrificed
Redirected Walking	Natural	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral
Intuitive striding unit	Constrained	Sacrificed	Neutral	Neutral	Sacrificed	Sacrificed
Body leaning + Joystick	Neutral	Constrained	Sacrificed	Sacrificed	Neutral	Neutral
Virtusphere	Natural	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral
VibroSkate	Neutral	Constrained	Neutral	Neutral	Constrained	Constrained
Stepper machine	Natural	Neutral	Neutral	Neutral	Sacrificed	Sacrificed
Omnidirectional treadmill	Natural	Natural	Neutral	Neutral	Natural	Natural
Joystick	Neutral	Neutral	Sacrificed	Sacrificed	Neutral	Neutral
Teleporting (HMD Controllers)	Constrained	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral
Accelerator pedal	Neutral	Constrained	Neutral	Neutral	Sacrificed	Sacrificed
World-In-Miniature	Natural	Neutral	Neutral	Optional	Neutral	Neutral

## 6. Fazit

In diesem Artikel präsentierten wir eine systematische Literaturübersicht über Fortbewegungstechniken in virtuellen Umgebungen. Die Ergebnisse zeigten, dass verschiedene Ansätze verwendet wurden, um den am besten geeigneten Weg zu finden, um in der virtuellen Umgebung zu reisen. Über fünfzig Prozent der besprochenen Arbeiten verwendeten die körperzentrierten Selbstbewegungshinweise, da es starke Argumente gibt, die ihre Rolle bei der Verbesserung der Orientierung und der räumlichen Beurteilung und der Verringerung der Reisekrankheit unterstützen (Bowman et al., 1998, 2004; Riecke et al., 2010). Wir haben eine Taxonomie von Fortbewegungstechniken in virtuellen Umgebungen vorgeschlagen, die Forschern eine klarere Vorstellung davon gibt, wie Benutzer in virtuellen Umgebungen reisen können, da sie die Fortbewegungstechnik nach ihren Hauptmerkmalen unterscheidet und klassifiziert. Unsere Taxonomie enthält auch Richtlinien, die Forschern bei der Auswahl der Fortbewegungstechnik helfen können, die an den Zweck ihres Experiments und die damit verbundenen Anwendungsfälle in der virtuellen Umgebung angepasst ist. Die Überprüfung der Literatur ermöglichte es uns festzustellen, dass klassische nicht natürliche Methoden wie der Joystick diese Techniken in den meisten überprüften Studien übertrafen, obwohl das breite Spektrum der verschiedenen Fortbewegungstechniken vorgeschlagen wurde. Außerdem zeichnet sich jede Technik durch unterschiedliche Vor- und Nachteile aus. So finden Sie eine effektive und intuitive Fortbewegungstechnik, die einfach zu verwenden ist, mit einer guten Steuerungspräzision, unter Beibehaltung der räumlichen Ausrichtung, Sicherstellung eines zufriedenstellenden Gefühls der Präsenz bei minimaler Müdigkeit und ohne Reisekrankheit. stellt immer noch eine bedeutende Herausforderung im Bereich der virtuellen Realität dar. Ein wichtiges Detail, das bei der Wahl der Fortbewegungstechnik gemäß dem Ziel des Experiments hilfreich sein kann, ist die Unterscheidung, welche Körperteile für die Fortbewegung eingesetzt werden. In der Tat kann das verwendete System in einigen Fällen in Konflikt mit den Interessenzentren der Forscher geraten, insbesondere für die Verhaltensbeobachtung durch Haltung. Außerdem können einige Bevölkerungsgruppen nicht jedes System verwenden, z. B. Rollstuhlfahrer. Unsere vorgeschlagene Taxonomie hilft bei der Auswahl eines an das Protokoll angepassten Tools. s Zentren von Interesse, insbesondere für die Verhaltensbeobachtung durch Haltung. Außerdem können einige Bevölkerungsgruppen nicht jedes System verwenden, z. B. Rollstuhlfahrer. Unsere vorgeschlagene Taxonomie hilft bei der Auswahl eines an das Protokoll angepassten Tools. s Zentren von Interesse, insbesondere für die Verhaltensbeobachtung durch Haltung. Außerdem können einige Bevölkerungsgruppen nicht jedes System verwenden, z. B. Rollstuhlfahrer. Unsere vorgeschlagene Taxonomie hilft bei der Auswahl eines an das Protokoll angepassten Tools.

Während Menschen beim Gehen in der realen Welt mühelos navigieren, ist es in virtuellen Umgebungen schwierig, eine realistische Simulation der natürlichen Fortbewegung zu erreichen (Nabiyouni et al., 2015). Omnidirektionale Laufbänder wurden für diesen Zweck entworfen und entwickelt und können eine mögliche Lösung sein. Abgesehen von der Tatsache, dass diese Bewegungsplattform immer noch teuer und schwer zu warten ist, ist sie auch nicht gut verstanden, da es nach unserem Kenntnisstand nur zwei Studien gibt, die sich auf die omnidirektionalen Laufbänder konzentrieren. Darüber hinaus ist diese Technik in Bezug auf die natürliche Verwendung von Körperteilen dem tatsächlichen Gang näher. In unserer zukünftigen Arbeit planen wir, diese neue Fortbewegungsschnittstelle zu untersuchen, indem wir ihre Verwendbarkeit für die Erkundung virtueller Umgebungen bestätigen und sie mit gängigen Fortbewegungstechniken in verschiedenen virtuellen Aufgaben vergleichen.

## 7. Referenzen

- Berger L., Wolf K., 2018. WIM: Schnelle Fortbewegung in der virtuellen Realität mit räumlichem Orientierungsgewinn und ohne Bewegungskrankheit. *Vorträge der 17. Internationalen Konferenz über mobile und allgegenwärtige Multimedia*, 19–24. doi: 10.1145 / 3282894.3282932
- Bowman DA, Koller D., Hodges LF, 1998. Eine Methodik zur Bewertung von Reisetechiken für Immersive virtuelle Umgebungen. *Virtual Real.*, 3 (2), 120–131. doi: 10.1007 / BF01417673
- Bowman DA, Koller D., Hodges LF, 1997. Reisen in immersiven virtuellen Umgebungen: Eine Bewertung von Viewpoint Motion Control-Techniken. *Proceedings of the 1997 Virtual Reality Jährliches Internationales Symposium (VRAIS '97)*, 45--.
- Bowman D., Kruijff E., LaViola Jr. JJ, Poupyrev IP, 2004. *3D-Benutzeroberflächen: Theorie und Praxis, CourseSmart eTextbook*. Addison-Wesley.
- Bozgeyikli E., Raji A., Katkooi S., Dubey R., 2019. Fortbewegung in der virtuellen Realität für Raumskala verfolgt Bereiche. *International Tagebuch von Mensch-Computer Studien*, 122, 38–49. xoi: 10.1016 / J.IJHCS.2018.08.002
- Bozgeyikli E., Raji A., Katkooi S., Dubey R., 2016a. Fortbewegung in der virtuellen Realität für Individuen mit Autismus-Spektrum-Störung. *Berichte des Symposiums 2016 über räumliche Benutzerinteraktion*, 33–42. doi: 10.1145 / 2983310.2985763
- Bozgeyikli E., Raji A., Katkooi S., Dubey R., 2016b. *Point & Teleport-Fortbewegungstechnik für Virtual Wirklichkeit*. 205–216. doi: 10.1145 / 2967934.2968105

- Brereton P., Kitchenham BA, Budgen D., Turner M., Khalil M., 2007. Lehren aus der Anwendung der Systematischer Literaturrechercheprozess im Bereich Software Engineering. *Zeitschrift für Systeme und Software*, 80 (4), 571–583. doi: 10.1016 / j.jss.2006.07.009
- Bruder G., Lubos P., Steinicke F., 2015. Anforderungen an die kognitiven Ressourcen des umgeleiteten Gehens. *IEEE Transaktionen zu Visualisierung und Computergrafik*, 21, 539–544.
- Bruder G., Steinicke F., Bolte B., Wieland P., Frenz H., Lappe M., 2013. Ausnutzung von Wahrnehmungsbeschränkungen und Illusionen, um das Gehen durch virtuelle Umgebungen auf engstem Raum zu unterstützen. *Anzeigen*, 34 (2), 132–141. doi: 10.1016 / j.displa.2012.10.007
- Bruno L., Pereira J., Jorge J., 2013. Ein neuer Ansatz für das Gehen an Ort und Stelle. In P. Kotzé, G. Marsden, G. Lindgaard, J. Wesson & M. Winckler (Hrsg.), *Vorlesungsunterlagen in Informatik (einschließlich Unterreihen Vorlesungsunterlagen in Künstlicher Intelligenz und Vorlesungsunterlagen in Bioinformatik): Vol. 8119 LNCS* (Ausgabe TEIL 3, S. 370–387). Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007 / 978-3-642-40477-1\_23
- Caggianes G., Gallo, L., Neroni P., (2015) Design und vorläufige Bewertung von Freihandreisen Techniken für tragbare immersive Virtual-Reality-Systeme mit egozentrischer Abtastung. *Vorträge der zweiten internationalen Konferenz über Augmented und Virtual Reality - Band 9254*, 399–408. doi: 10.1007 / 978-3-319-22888-4\_29
- Calandra D., Billi M., Lamberti F., Sanna A., Borchellini R., 2018. Armschwingen gegen Laufband: A. Vergleich zweier Techniken zur Fortbewegung in der virtuellen Realität. *Tagungsband der 39. Jahrestagung der Europäischen Vereinigung für Computergrafik: Short Papers*, 53–56.
- Cherep LA, Lim AF, Kelly JW, Acharya D., Velasco A., Bustamante E., Ostrander AG, Gilbert SB, 2020. Räumliche kognitive Implikationen des Teleportierens durch virtuelle Umgebungen. *Journal of Experimental Psychology: Angewandt*. doi: 10.1037 / xap0000263 Cherni H., 2012. Einfluss virtueller Informationsmerkmale bei der Suche nach Zielen: *Perspektiven in kognitive Rehabilitation*. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM.
- Guy E., Punpongson P., Iwai D., Sato K., Boubekur T., 2015. LazyNav: 3D-Bodennavigation mit Nicht-kritische Körperteile. *IEEE-Symposium 2015 zu 3D-Benutzeroberflächen, 3DUI 2015 - Proceedings*, 43–50. doi: 10.1109 / 3DUI.2015.7131725
- Habgood MPJ, Moore D., Wilson D., Alapont S., 2018. Schnelle, kontinuierliche Bewegung zwischen Knoten als eine zugängliche VirtualReality-Fortbewegungstechnik. *2018 IEEE-Konferenz über virtuelle Realität und 3D-Benutzeroberflächen (VR)*, 371–378. doi: 10.1109 / VR.2018.8446130 Hale KS, Stanney KM, 2014. *Handbuch für virtuelle Umgebungen: Design, Implementierung und Anwendungen* (2. Aufl.). CRC Press, Inc.
- Harris A., Nguyen K., Wilson PT, Jackoski M., Williams B., 2014. Menschlicher Joystick: Wii-Neigung zu Übersetzen Sie in großen virtuellen Umgebungen. *Vorträge der 13. Internationalen Konferenz von ACM SIGGRAPH über das Kontinuum der virtuellen Realität und seine Anwendungen in der Industrie*, 231–234. doi: 10.1145 / 2670473.2670512
- Kitson A., Hashemian AM, Stepanova ER, Kruijff E., Riecke BE, 2017a. Vergleich von Leaning-basierten Motion-Cueing-Schnittstellen für die Fortbewegung in der virtuellen Realität. *IEEE-Symposium 2017 zu 3D-Benutzeroberflächen, 3DUI 2017 - Proceedings*, 73–82. doi: 10.1109 / 3DUI.2017.7893320 Kitson A., Hashemian A., Stepanova E., Kruijff E., Riecke B., 2017b. *Lehn dich hinein: Erkundung auf der Basis von Leaning Motion-Cueing-Schnittstellen für Virtual-Reality-Bewegungen*. 215–216. doi: 10.1109 / VR.2017.7892253
- Kitson A., Riecke BE, Hashemian AM, Neustaedter C., 2015. NaviChair: Bewertung einer verkörpert Schnittstelle Verwenden einer Zeigeaufgabe zum Navigieren in der virtuellen Realität. *Vorträge des 3. ACM-Symposiums zur räumlichen Benutzerinteraktion*, 123–126. doi: 10.1145 / 2788940.2788956
- Kruijff E., Marquardt A., Trepkowski C., Lindeman RW, Hinkenjann A., Maiero J., Riecke BE, 2016. Am Ihre Füße!: Verbesserung der Vektion in lehn-basierten Schnittstellen durch multisensorische Stimuli. *Verfahren von das 2016 Symposium auf Räumlich Nutzer Interaktion*, 149–158. doi: 10.1145 / 2983310.2985759
- Kruijff E., Riecke B., Trepkowski C., Kitson A., 2015. Das Neigen des Oberkörpers kann die Vorwärtsbewegung beeinflussen Wahrnehmung in virtuellen Umgebungen. *Vorträge des 3. ACM-Symposiums zur räumlichen Benutzerinteraktion*, 103–112. doi: 10.1145 / 2788940.2788943
- Lathrop WB, Kaiser M., 2002. Wahrgenommene Orientierung in physischen und virtuellen Umgebungen: Veränderungen in Wahrgenommene Orientierung als Funktion der verfügbaren idiothetischen Informationen. *Präsenz (Cambridge, Mass.)*, 11 (1), 19–32. doi: 10.1162 / 105474602317343631
- Lee J., Ahn SC, Hwang J.-I., 2018. Eine Methode für die virtuelle Realität unter Verwendung von Position und Orientierungsverfolgung. *Sensoren (Basel, Schweiz)*, 18 (9). doi: 10.3390 / s18092832
- Linn AM, 2017. *Blick Teleportation in der virtuellen Realität*. KTH, Fakultät für Informatik und

Kommunikation, Masterarbeit.

- Matsumoto K., Ban Y., Narumi T., Yanase Y., Tanikawa T., Hirose M., 2016. Unbegrenzter Korridor: Umgeleitet Geotechniken mit visuo-haptischer Interaktion. *ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies*, 20: 1-20: 2. doi: 10.1145 / 2929464.2929482
- McCullough M., Xu H., Michelson J., Jackoski M., Pease W., Cobb W., Kalescky W., Ladd J., Williams B., 2015. Myo Arm: Schwingen, um eine VE zu erkunden. *Vorträge des ACM SIGGRAPH Symposiums zur angewandten Wahrnehmung*, 107–113. doi: 10.1145 / 2804408.2804416
- McMahan RP, Bowman DA, Zielinski DJ, Brady RB, 2012. Bewertung der Wiedergabetreue und Interaktion Treue in einem Virtual Reality-Spiel. *IEEE-Transaktionen zu Visualisierung und Computergrafik*, 18 (4), 626–633. doi: 10.1109 / TVCG.2012.43
- Nabiyouni M., Saktheeswaran A., Bowman DA, Karanth A., 2015. Vergleich der Leistung von natürlichen, naturnahe und nichtnatürliche Fortbewegungstechniken in der virtuellen Realität. *IEEE-Symposium 2015 zu 3D-Benutzeroberflächen (3DUI)*, 3–10. doi: 10.1109 / 3DUI.2015.7131717
- Nilsson NC, Serafin S., Laursen MH, Pedersen KS, Sikström E., Nordahl R., 2013. Tapping-In-Place: Steigerung der Natürlichkeit der immersiven Fortbewegung vor Ort durch neuartige gestische Eingaben. *IEEE-Symposium 2013 zu 3D-Benutzeroberflächen (3DUI)*, 31–38. doi: 10.1109 / 3DUI.2013.6550193
- Ohshima T., Ishihara H., Shibata R., 2016. Virtuelle ISU: Fortbewegungsschnittstelle für immersives VR-Gaming in Sitzposition. *Tagungsband der Virtual Reality International Conference 2016*, 2: 1--2: 4. doi: 10.1145 / 2927929.2927941
- Razzaque S., 2005. *Umgeleitetes Gehen*. Universität von North Carolina in Chapel Hill.
- Riecke BE, Bodenheimer B., McNamara TP, Williams B., Peng P., Feuereissen D., 2010. Müssen wir Gehen Sie für eine effektive Virtual-Reality-Navigation? Allein physische Rotationen können ausreichen. *Vorträge der 7. Internationalen Konferenz über räumliche Wahrnehmung*, 234–247.
- Riecke BE, LaViola Jr.JJ, Kruijff E., 2018. 3D-Benutzeroberflächen für virtuelle Realität und Spiele: 3D Auswahl, Manipulation und räumliche Navigation. *ACM SIGGRAPH 2018 Kurse*, 13: 1-13: 94. doi: 10.1145 / 3214834.3214869
- Ruddle RA, Lessels S., 2006. Für eine effiziente Navigationssuche benötigen Menschen volle körperliche Bewegung. aber keine reichhaltige visuelle Szene. *Psychologische Wissenschaft*, 17 (6), 460–465. doi: 10.1111 / j.1467-9280.2006.01728.x
- Sato D., Ezoe M., Hino A., Shimizu A., Mitake H., Hasegawa S., 2015. VibroSkate: eine Fortbewegungsschnittstelle mit der genauen Haptik und Kinästhesie. *SIGGRAPH Emerging Technologies*.
- Slater M., Usoh M., Steed A., 1995. Schritte unternehmen: Der Einfluss einer Geotechnik auf die Präsenz in Virtuelle Realität. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 2 (3), 201–219. doi: 10.1145 / 210079.210084
- Steinicke F., Bruder G., Jerald J., Frenz H., Lappe M., 2010. Schätzung der Nachweisschwellen für Umgeleitete Geotechniken. *IEEE-Transaktionen zu Visualisierung und Computergrafik*, 16 (1), 17–27. doi: 10.1109 / TVCG.2009.62
- Tregillus S., Folmer E., 2016. VR-STEP: In-Place-Walking mit Inertial Sensing für die Freisprechnavigation in mobilen VR-Umgebungen. *Berichte der CHI-Konferenz 2016 über Human Factors in Computersystemen*, 1250–1255. doi: 10.1145 / 2858036.2858084
- Warren LE, Bowman, DA, 2017. Benutzererfahrung mit naturnahen Fortbewegungstechniken in Virtual Realität: Der Fall des Virtuix Omni. *Vorträge des 5. Symposiums zur räumlichen Benutzerinteraktion*, 163. doi: 10.1145 / 3131277.3134359
- Wilson, PT, Kalescky, W., MacLaughlin, A. & Williams, B. (2016). VR-Fortbewegung: Gehen> Gehen an Ort und Stelle> Armschwingen. *Vorträge der 15. ACM SIGGRAPH-Konferenz zum Virtual-Reality-Kontinuum und seinen Anwendungen in der Industrie - Band 1*, 243–249. doi: 10.1145 / 3013971.3014010
- Zank M., Kunz A., 2015. Verwenden von Fortbewegungsmodellen zur Schätzung von Laufzielen in immersiven virtuellen Umgebungen. *Berichte der Internationalen Konferenz über Cyberwelten (CW) 2015*, 229–236. doi: 10.1109 / CW.2015.20
- Zielasko D., Horn S., Freitag S., Weyers B., Kuhlen TW, 2016. Bewertung von Freisprech-HMD-basierten Navigationstechniken für die immersive Datenanalyse. *IEEE-Symposium 2016 zu 3D-Benutzeroberflächen, 3DUI 2016 - Proceedings*, 113–119. doi: 10.1109 / 3DUI.2016.7460040