

Projekt Marvel 2025

Audiostudie

Jule Behler, Finn Thorwart, Emely Grundmanns, Marie Lehmann, Anna Nele Puntke

1

September 22, 2025

ABSTRACT

Für das MARVEL-Projekt wurde eine virtuelle Umgebung des Mars entwickelt, welche sowohl die visuellen als auch die akustischen Eigenschaften der Marsatmosphäre simuliert. Neben dem Hauptziel, eine realitätsnahe Marsmission mit Robotern in Spielform zu erstellen, lag ein besonderer Fokus auf der Nachbildung der akustischen Atmosphäre. Dafür wurde begleitend eine Studie durchgeführt, die die auditive Distanzwahrnehmung untersuchen sollte. Zusätzlich wurde getestet, ob die für den Mars charakteristische akustische Dispersion vom menschlichen Ohr wahrgenommen wird. Die Teilnehmenden schätzten Distanzen verschiedener Klangquellen unter Erd- und Marsbedingungen in Virtual Reality. Zusätzlich gaben sie an, wie sicher sie sich bei ihren Einschätzungen fühlten. Die Ergebnisse zeigen, dass die akustische Dispersion kaum wahrnehmbar ist und keinen signifikanten Einfluss auf die Schätzung hatte. Es wurde zudem noch überprüft, ob es einen Zusammenhang zwischen dem Sicherheitsgefühl der Einschätzung und der Genauigkeit der Einschätzung gibt. Hier konnte nur ein schwacher Zusammenhang festgestellt werden. Die Ergebnisse legen nahe, dass die akustische Dispersion für die menschliche Wahrnehmung in diesem Kontext eher vernachlässigt werden kann. Andere Effekte sind hingegen sehr wichtig für die Distanzwahrnehmung. Die Resultate sind wichtig für akustische Simulationen in Virtual Reality und können zukünftige Projekte unterstützen.

1. Einleitung

Im Rahmen eines Bachelorprojekts wurde das MARVEL (Mars Audio-Realistic Virtual Exploration League)-Projekt entwickelt, das sich mit der audiovisuellen Gestaltung einer virtuellen Mars-Umgebung beschäftigt. Ziel ist es, eine realitätsnahe und interaktive Virtual-Reality-Erfahrung zu schaffen, in der sowohl visuelle als auch akustische Elemente die Immersion der Spielenden unterstützen. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Nachbildung der einzigartigen akustischen Bedingungen des Mars, um ein möglichst authentisches Klangerlebnis zu ermöglichen. In diesem Rahmen wurde eine Studie konzipiert, die Mechanismen der auditiven Distanzwahrnehmung in virtuellen Umgebungen zu untersuchen und dabei insbesondere den Einfluss veränderter akustischer Bedingungen auf die räumliche Klangwahrnehmung zu analysieren. Zusätzlich wird untersucht, ob der Marseffekt, die auditive Dispersion, von Proband:innen wahrgenommen wird. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen zu einem besseren Verständnis der auditiven Orientierung in Virtual-Reality-Szenarien beitragen und damit die Entwicklung realitätsnaher akustischer Simulationen unterstützen.

2. Related work

Die akustischen Eigenschaften der Marsatmosphäre waren lange Zeit nur durch theoretische Modelle beschrieben. Mit der Druck- und Gaszusammensetzung wurden Vorhersagen für die Marsakustik getätigt (Petculescu and Lueptow, 2006). Seit 2021 ermöglicht der Perseverance Rover durch zwei Mikrofone erstmals detaillierte Aufnahmen der akustischen Umgebung des Mars. Untersuchungen zeigen eine stark frequenzabhängige Schallausbreitung, mit zwei unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten sowie einer besonders starken Dämpfung

höherer Frequenzen. Neben der Charakterisierung von Mikrostruktur und Turbulenzen der Atmosphäre wurden durch die Audiodaten erstmals Druckschwankungen über 20 Hz gemessen. Diese akustischen Methoden erweitern herkömmliche Ansätze und liefern wertvolle Informationen über Temperatur- und Druckveränderungen in der Marsatmosphäre. (8)

In den letzten Jahren wurden jedoch enorme Fortschritte in diesem Feld gemacht, erstmals wurden 2021 konkrete Aufzeichnungen vom Ton mit dem SuperCam-Mikrofon des Perseverance Rovers gemacht (Maurice et al., 2022). Es wurden damit einerseits Umgebungsgeräusche wie Wind und die Geräusche der Ingenuity Drohne dokumentiert, andererseits wurden auch laserinduzierte Schallereignisse (LIBS) aufgezeichnet, die bei der Analyse von Gesteinsproben entstehen (Mimoun et al., 2022). Mit diesen Messungen konnte bestätigt werden, dass die Akustik auf dem Mars leiser ist als auf der Erde und es eine frequenzabhängige Schallgeschwindigkeit gibt (Maurice et al., 2022).

Mit den Messungen des SuperCam-Mikrofons auf dem Mars wurden zudem atmosphärische Dynamiken untersucht. So konnten zum ersten Mal direkte akustische und visuelle Beobachtungen eines Dust Devils (rotierende Wirbelstürme, die Staub und Sand aufwirbeln) aufgezeichnet werden (Murdoch et al. 2022).

Mithilfe der Perseverance Mikrofonaufnahmen konnte erstmals die akustische Umgebung auf dem Mars charakterisiert werden. Dabei zeigte sich eine deutliche Dispersion des Schalls, mit zwei unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten unterhalb und oberhalb von etwa 240 Hz. Dieses bislang nur theoretisch vorhergesagte Verhalten ist eine Besonderheit der CO₂ dominierten Niederdruckatmosphäre. Die Ergebnisse schaffen eine Grund-

10

20

30

40

50

60

lage für die Modellierung akustischer Prozesse in den Atmosphären von Mars und Venus. (Murdoch et al. 2022)

Durch die Analyse von Laseraufnahmen des SuperCam-Instruments konnte erstmals die Schallgeschwindigkeit auf dem Mars direkt gemessen werden. Grundlage hierfür war die Zeitverzögerung zwischen dem Einschlag des Lasers auf ein Gestein und dem Eintreffen des Schallsignals am Mikrofon in 2,1 m Höhe. Damit wurde gezeigt, dass trotz des sehr niedrigen Atmosphärendrucks von nur 6 mbar eine effektive Schallausbreitung möglich ist. Die Methode liefert präzise Daten zur akustischen Charakterisierung der Marsatmosphäre und ergänzt klassische geophysikalische Messungen. (Katherine Wright 2022)

Untersuchungen zur Akustik auf dem Mars zeigen deutliche Unterschiede gegenüber irdischen Bedingungen. Aufgrund der geringen Temperatur und Atmosphäre ist die Schallgeschwindigkeit mit etwa 240 m/s niedriger als auf der Erde mit 340 m/s. Zudem führt die rund 100-fach geringere Dichte der Marsatmosphäre zu einem deutlich abgeschwächten Schalldruck, sodass Geräusche leiser wahrgenommen werden. Schließlich verursacht die CO₂-reiche Atmosphäre eine starke Dämpfung hoher Frequenzen, dies führt dazu, dass tiefere Töne über größere Distanzen hörbar bleiben. Zusammengefasst verändern diese Faktoren die Wahrnehmung von Lautstärke, Geschwindigkeit und Klangfarbe. (NASA 2024)

Unsere Arbeit knüpft hier an und erweitert den Fokus auf die menschliche Wahrnehmung. Wir wollen herausfinden, wie die physikalischen Erkenntnisse auf den Menschen wirken und wie dies in Virtual Reality realitätsnah umgesetzt werden kann. Zudem sollte erwähnt werden, dass diese Thematik noch relativ frisch in der Forschung ist und es noch keine große Anzahl an Studien, Papers etc. gibt und die veröffentlicht wurden, sich teilweise auch sehr ähnlich sind vom Inhalt.

3. Vorstellung des Projekts und der Studie

Das MARVEL-Projekt ist im Rahmen eines Bachelorprojekts von einer Gruppe Studierender entstanden. Es handelt sich dabei um ein Virtual-Reality-Projekt, in dem die spielende Person als ein Roboter oder Astronaut auf den Mars geschickt werden kann. Die Studierenden haben eine marsähnliche Karte erstellt und sich überlegt, wie Höhlen auf dem Mars aussehen könnten, in denen möglicherweise Wasser vorkommt. Außerdem wurden verschiedene Funktionen umgesetzt, wie etwa die Möglichkeit, dass mehrere Roboter gleichzeitig an einen Ort „teleportiert“ werden können. Das gesamte System läuft über einen zentralen Server, sodass mehrere Personen gleichzeitig in der virtuellen Umgebung spielen und interagieren können. Abschließend führten die Studierenden eine Recherche durch, um herauszufinden, wie sich der Mars anhören würde, und entwickelten Ansätze, um diese Klangkulisse in das Projekt zu integrieren. Gleich zu Beginn der Recherchen legten die Studierenden fest, welche Anforderungen an die akustische Gestaltung des Projekts MARVEL gestellt werden sollten. Der Ton soll für die Nutzenden umschaltbar sein, sodass zwischen einer an die Mars-Umgebung und einer an die Erd-Umgebung angepassten Klangkulisse gewechselt werden kann. Die Mars-Klangkulisse wird dabei so gestaltet, dass sie einer nächtlichen Geräuschkulisse entspricht, um eine möglichst störungsfreie Wahrnehmung zu ermöglichen. Außerdem verändert sich die Klangkulisse subtil, wenn sich die Nutzenden in einer Höhle befinden. Darüber hinaus sollen verschiedene Klänge auf Knopfdruck abgespielt werden können. Schließlich wird angestrebt, sämtliche Elemente des Projekts – von den Robotern bis hin zum NPC, der die Funktionen erklärt – mit passenden Soundeffekten

zu vertonen. Für die Umsetzung der akustischen Anforderungen wurden im finalen Projekt mehrere Lösungen realisiert. Im Endprodukt existiert eine Kontrollzentrale, über die die Nutzenden mittels Knopfdruck zwischen den verschiedenen Klangkulissen wechseln können: Der der Erde und der des Marses. Zusätzlich ermöglicht die Zentrale das gezielte Abspielen verschiedener Klänge über weitere Bedienelemente. Die Höhlenbereiche wurden mit einer Reverb-Funktion ausgestattet, sodass sich die akustische Wahrnehmung verändert, sobald ein Ton innerhalb dieses Bereichs erzeugt wird. Sämtliche Roboter sind mit Soundeffekten ausgestattet, die über die Eingabesteuerungen aktiviert werden. Die Auswahl und Gestaltung dieser Klänge erfolgt auf Basis fundierter Recherche. Für die Mars-Klangkulisse wurde eine spezifische Dämpfungskurve implementiert, die dafür sorgt, dass die Lautstärke der Klänge bei geringem Abstand leiser wahrgenommen wird als auf der Erde. Zusätzlich erhielten die Klänge einen Equalizer-Filter, um den Ton dumpfer zu machen und an die akustische Umgebung des Mars anzupassen. Im Detail wird auf die Klang-Funktionen im Artikel Bereich unter “Umsetzung im Projekt” eingegangen.

4. Hintergrund: Akustische Besonderheiten auf dem Mars

4.1. Marsatmosphäre

Die Marsatmosphäre unterscheidet sich grundlegend von der Erdatmosphäre. Dies hat unter anderem Folgen auf die Akustik, worauf wir in unserem Projekt achten müssen. Der Mars hat eine sehr dünne Atmosphäre, der Druck beträgt dabei nur durchschnittlich 0,6 Prozent des Drucks auf der Erde. Zudem besteht die Marsatmosphäre fast ausschließlich aus CO₂ (Banfield et al., 2020). Diese Faktoren beeinflussen die Ausbreitung des Schalls erheblich. Der geringe Druck führt zu einer niedrigen akustischen Impedanz, was zu leiseren Klängen im Gegensatz zur Erde führt, wenn Klangquelle und Klangaufnahme jeweils mit der gleichen Distanz zueinander sind. Diese (zuvor theoretischen) Schlussfolgerungen (Petculescu, Lueptow, 2006) wurden 2021 durch die Messungen vom Perseverance Rover bestätigt. (Maurice et al., 2022).

4.2. Turbulenzen und zeitliche Faktoren

Die Schallausbreitung in der Marsatmosphäre ist nicht konstant. Es gibt gewisse Dynamiken, wie Turbulenzen und saisonale Schwankungen, durch die Akustik verändert wird. Diese Dynamiken lassen sich sowohl nach Tageszeit (Tag/Nacht), als auch nach Jahreszeiten unterscheiden. Es wurden Messungen mit dem SuperCam-Mikrofon auf dem Perseverance Rover gemacht. Die Intensität der Schallwellen, die durch einen Laser verursacht wurde, hat deutliche Schwankungen auf der Amplitude hinterlassen. Dabei zeigte sich, dass die akustische Verzerrung tagsüber, besonders mittags, am größten ist. Aufgrund der Turbulenzen streuen die gemessenen Schallamplituden tagsüber um rund +/- 10 Prozent um den Mittelwert. (Chide et al., 2023) Während der Dämmerung und nachts, wenn sich die Atmosphäre abkühlt, sind die Streuungen auf der Amplitude geringer. Bei gleicher Distanz liegt die Streuung nur bei etwa +/- 4 Prozent um den Mittelwert, was eine stabilere Schallausbreitung zu Grunde legt. (Chide et al., 2023) Zusätzlich zu den Unterschieden innerhalb eines Tages, beeinflussen ebenso die saisonalen Veränderungen die Schallausbreitung. Die durchschnittliche Schallintensität einer konstanten Quelle kann sich während eines Jahres um bis zu dem Faktor 1,8

ändern. (Chide et al., 2023) Diesen Effekt haben wir für unser Projekt jedoch nicht berücksichtigt, weil dieses nur für eine kurze Zeitspanne ausgelegt ist und keine Jahreszeiten durchläuft. Aufgrund dieser Erkenntnisse haben wir uns entschieden, als akustisches Szenario für das Projekt von einem nächtlichen bzw. dämmernden Mars auszugehen. Damit soll eine weitgehend realistische Umsetzung der Marsbedingungen erreicht werden.

4.3. Dämpfung (und Absorption)

Durch die Marsatmosphäre mit einem geringen Druck und einem sehr hohen CO₂-Gehalt verliert der Schall auf dem Mars viel schneller seine Energie als auf der Erde (Petculescu and Lueptow et al., 2007). Die akustische Impedanz ist auf dem Mars sehr gering, was dazu führt, dass die Schallwellen nicht so weit getragen werden können. Bei gleicher Quelle sind Töne etwa 20 dB leiser als auf der Erde (Maurice et al., 2022). Zudem absorbiert der hohe CO₂-Gehalt deutlich mehr Schallenergie als zum Beispiel Stickstoff oder Sauerstoff, welche die Erdatmosphäre dominieren (Petculescu and Lueptow et al., 2007). Außerdem werden hochfrequente Töne besonders stark gedämpft. Dies wurde durch Messungen des Perseverance Rovers bestätigt. Tieffrequente Töne, wie Rotorgeräusche der Ingenuity (84Hz und 168Hz) waren auch noch in Entfernungen bis zu 100 m vernehmbar, während hochfrequenten Töne (3kHz bis 21kHz) bereits nach wenigen Metern kaum mehr zu erkennen waren (Chide et al., 2023). Diese Dämpfung muss in unserem Projekt berücksichtigt und eingebaut werden.

4.4. Schallgeschwindigkeit und Dispersion

Die Schallgeschwindigkeit hängt von Temperatur und Zusammensetzung der Atmosphäre ab. Auf der Erde beträgt sie bei ca 20°C etwa 343 m/s (Physics Libre Texts, Engineering Toolbox). In der dünnen CO₂-reichen Marsatmosphäre ist die Schallgeschwindigkeit deutlich geringer und liegt typischerweise zwischen 240 m/s und 250 m/s (Maurice et al., 2022). Eine Besonderheit des Mars ist, dass die Schallgeschwindigkeit frequenzabhängig ist. Töne unterhalb von ca. 240 Hz breiten sich mit etwa 240 m/s aus, während höhere Frequenzen über 240 Hz bei rund 250 m/s liegen. Dieses Phänomen kann als akustische Dispersion bezeichnet werden und wurde durch die Mikrofone des Perseverance Rovers nachgewiesen (Maurice et al., 2022; Chide et al., 2023). Ursache ist die starke Rolle der molekularen Relaxationsprozesse von CO₂, die dazu führen, dass verschiedene Frequenzen unterschiedlich schnell übertragen werden (Petculescu and Lueptow, 2007). Der Effekt ist wissenschaftlich sehr interessant, jedoch für die menschliche Wahrnehmung weniger relevant. Bei kurzen Distanzen ergeben sich Zeitunterschiede von wenigen Millisekunden, die von Menschen kaum gehört werden können. Bei größeren Distanzen wird der Effekt der Dispersion zwar stärker, gleichzeitig werden aber durch die starke Dämpfung besonders die hohen Frequenzen enorm abgeschwächt, sodass der Effekt für das menschliche Ohr nur noch kaum bis nicht mehr wahrnehmbar ist (Maurice et al. 2022; Chide et al., 2023). Aus diesem Grund haben wir uns dazu entschieden, die Dispersion nicht in das Projekt zu integrieren. Die technische Umsetzung wäre aufwändig gewesen, hätte aber keinen erkennbaren Unterschied für die akustische Erfahrung in unserer Simulation geboten. Diese Annahme haben wir zusätzlich in unserer Studie überprüft.

5. Umsetzungen im Projekt

5.1. Kontrollzentrale

Um einen direkten auditiven Vergleich zwischen der Mars- und der Erd-Atmosphäre zu ermöglichen, wurde eine Methode implementiert, mit der während des Experiments zwischen beiden Klangumgebungen umgeschaltet werden kann. Zu diesem Zweck wurde in der virtuellen Umgebung eine Kontrollzentrale integriert, über die der Wechsel zwischen den Atmosphären erfolgt. Auf der Kontrollzentrale befinden sich zwei schwebende Knöpfe (siehe Abbildung), die mit „Mars“ und „Erde“ beschriftet sind. Nach dem Betätigen zeigt der jeweils aktive Knopf visuell an, welche akustische Umgebung aktuell aktiv ist. Darunter befindet sich ein weiteres Bedienpanel mit sechs zusätzlichen Knöpfen, über die verschiedene Klangquellen ein- oder ausgeschaltet werden können.

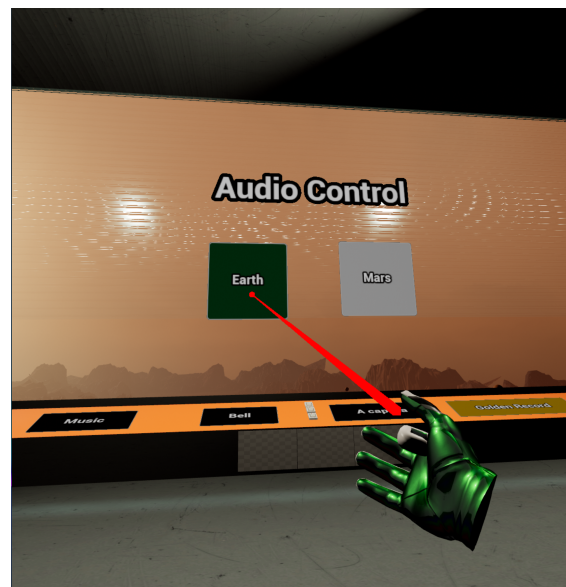


Fig. 1: Kontrollzentrale

Je nachdem, welcher der beiden Hauptknöpfe („Mars“ oder „Erde“) aktiviert ist, wird im Hintergrund ein entsprechendes Array ausgelöst. In diesem Array sind die jeweils passenden Audioeffekte für die gewählte Atmosphäre hinterlegt und werden dynamisch auf die aktiven Klangquellen angewendet.

5.2. Marseffekte

Ziel der Effekte, ist es eine Balance zwischen realitätsnaher Audio-Simulation und einem immersiven Spielerlebnis zu ermöglichen. Die große Herausforderung ist hierbei die sehr stille Atmosphäre durch die kurzen Schallreichweiten. Diese kurzen Reichweiten stehen im Konflikt mit einem gewohnten Spielerlebnis, bei dem Akustik ein extrem wichtiges Element in Form von Musik, Atmosphäre und weiteren Effekten darstellt. Bei der Simulation haben wir uns hauptsächlich an dem Paper "In situ recording of Mars soundscape" von "Maurice, S. et al." (1) orientiert.

Effekte für die Studie

Um möglichst gute Einstellungsmöglichkeiten zu haben, wurden die Effekte für die Studie nicht dynamisch in Unreal hinzugefügt, sondern die Sounds wurden im Vorfeld mit Adobe Audition bearbeitet.

Hauptsächlich wurde ein EQ in Kombination mit einer Komprimierung genutzt. Die Dämpfungskurve wurde in Unreal angelegt und angewendet. Der Dispersionseffekt wurde mithilfe einer zweiten Spur, die um das Zeitdelta verschoben wurde realisiert. Die Spuren hatten entsprechend einen Highpass und Lowpass Filter bei 240 Hz

Für die Berechnung des EQs wurde folgende Formel verwendet:

5.2.1. Berechnung der EQ-Kurve

Die Berechnung der frequenzabhängigen Dämpfung auf dem Mars basiert auf dem Absorptionskoeffizienten $\alpha(f)$ (in m^{-1}). Dieser beschreibt, wie stark eine Schallwelle pro Meter abgeschwächt wird. Multipliziert man $\alpha(f)$ mit der Distanz L , erhält man die Dämpfung in Nepers:

$$\alpha(f) \cdot L \quad [\text{Np}](10)$$

Umrechnung in Dezibel erfolgt über den Faktor $20 \cdot \log_{10}(e) \approx 8,686$:

$$A_{\text{dB}} = 20 \cdot \log_{10}(e) \cdot \alpha(f) \cdot L = 8.686 \cdot \alpha(f) \cdot L$$

Dabei gilt:

- $\alpha(f)$ – frequenzabhängiger Absorptionskoeffizient in m^{-1}
- L – Ausbreitungsdistanz in Metern
- A_{dB} – Pegelverlust in Dezibel

Die Werte für $\alpha(f)$ wurden aus der in (1) publizierten Dämpfungskurve abgelesen, genutzt wurde die Williams Kurve. Dazu wurden die relevanten standard Frequenzen (31 Hz, 62 Hz, 125 Hz, ..., 16 kHz) aus der Grafik abgelesen.

Für die Equalizer-Kurve wird der Verlust direkt als negativer Gain-Wert umgesetzt:

$$\text{EQ-Gain}(f) = -A_{\text{dB}}$$

Dies bedeutet: je höher die Frequenz und je größer die Distanz, desto stärker muss der EQ den Pegel absenken, um die marsähnliche Akustik zu simulieren. Die in den Tabellen (7) dargestellten Werte ergeben sich direkt aus dieser Formel für unterschiedliche Frequenzbänder und Distanzen.

2k Hz	4k Hz	8k Hz	16k Hz
-3.7db	-5.2db	-8.8db	-13db

Table 4: Mars 5m

<31 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz
-4.5db	-8.4db	-14.3db	-12.3db	-10.4db	-9.8db

Table 5: Mars 15m

2k Hz	4k Hz	8k Hz	16k Hz
-11db	-15.6db	-23.4db	-40db

Table 6: Mars 15m

<31 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz
-15db	-28db	-47.5db	-41db	-34.5db	-32.5db

Table 7: Mars 50m

2k Hz	4k Hz	8k Hz	16k Hz
-37db	-52db	-60db	-60db

Table 8: Mars 50m

5.2.2. Anwendung der Komprimierung

Die Komprimierung sollte zusätzlich für eine reduzierte Dynamik sorgen, hierbei ist wichtig, die Komprimierung wurde in der Reihenfolge nach dem EQ angewendet, diese greift nur ab Erreichen der Schwellwerte, die nicht immer erreicht wurden. Die entsprechenden Werte wurden durch ausprobieren ermittelt um einen leichten Kompressionseffekt zu erzeugen. Je höher die Frequenz, desto so früher und stärker ist die Kompression.

Frequenz	> 125 Hz	125 Hz - 1k Hz	1k Hz - 4k Hz	> 4k Hz
Schwelle	-25 db	-28db	-30db	-32db
Verstärkung	-2 db	-3db	-4db	-6db
Verhältnis	10:1	12:1	15:1	18:1

Table 9: Kompressionseinstellungen

5.2.3. Dispersionseffekt

Die Berechnung des Zeitdeltas für den Dispersionseffekt kann mit einem Dreisatz ermittelt werden. Für hohe Frequenzen ($f > 240 \text{ Hz}$):

$$t_1 = \frac{d}{v_1} = \frac{d}{240 \text{ m/s}}$$

Für niedrige Frequenzen ($f < 240 \text{ Hz}$):

$$t_2 = \frac{d}{v_2} = \frac{d}{230 \text{ m/s}}$$

Laufzeitdifferenz (Dispersion)

$$\Delta t = t_2 - t_1 = d \left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1} \right)$$

320

<31 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz
-0.3db	-0.6db	-1db	-0.8db	-0.7db	-0.6db

Table 1: Mars 1m

2k Hz	4k Hz	8k Hz	16k Hz
-0.7db	-1db	-1.5db	-2.6db

Table 2: Mars 1m

<31 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz
-1.5db	-2.8db	-4.7db	-4.1db	-3.4db	-3.2db

Table 3: Mars 5m

5.3. Höhlen

Für die Höhlen im Projekt wurde in Unreal Engine das Plugin Audio Gameplay Volumes integriert. Dieses Plugin ermöglicht es, transparente Boxen im Raum zu platzieren, die mit spezifischen Audioeffekten belegt werden können. Beim Betreten dieser Bereiche werden die entsprechenden Effekte automatisch aktiviert. Im Projekt sind alle Höhlen von solchen transparenten Boxen umgeben, die zwei Audioeffekte enthalten. Einer davon ist der vorgefertigte „Cave-Reverb“-Effekt aus Unreal Engine, der dafür sorgt, dass der Klang in den Höhlen leicht nachhallt und so zu einer realistischeren und atmosphärischeren Akustik beiträgt.

5.4. Vertonung der Roboter

Im Projekt existieren insgesamt sechs unterschiedliche Roboter sowie ein Astronaut, der von den Spielenden gesteuert werden kann. Für jeden dieser Roboter wurden individuelle Bewegungs- und Fortbewegungssounds ausgewählt, um ihre Charakteristik und Funktionsweise akustisch zu unterstreichen. Die jeweiligen Sounds werden durch Eingaben über den Controller ausgelöst und dynamisch abgespielt, sodass Bewegungen der Roboter auch auditiv erlebbar werden.

Charlie ist ein vierbeiniger Roboter, dessen Beine sich auch seitlich bewegen können. Für seine Fortbewegung wurde der Sound „horse-walks-on-sandy-surface“ ausgewählt. Einzelne Schritte wurden aus dieser Aufnahme herausgeschnitten und werden während der Bewegung zufällig abgespielt, teilweise auch leicht überlappend, um einen lebendigen und natürlichen Geh-Eindruck zu erzeugen.

Crex verfügt über sechs spinnenartige Beine und ist dafür konzipiert, sich auch in schwierigem Terrain fortzubewegen. Dabei bewegt er seine Beine nacheinander. Für ihn wurde der Sound „squeaky-toy-robot-walking“ verwendet, der die mechanisch-abgehackte, aber zugleich flexible Fortbewegung unterstreicht.

Ingenuity ist ein kleines Flugobjekt, dessen Design von der realen Ingenuity-Drohne inspiriert wurde. Es wurde der Sound „small-drone-hovering-flying“ verwendet. Das Flugobjekt führt rund 2.400 Umdrehungen pro Minute aus (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2025). Aufgrund dieser hohen Rotationsgeschwindigkeit ist der Klang höherfrequent, was durch den ausgewählten Drohnensound gut abgebildet wird.

Artemis ist ein kleiner, motorisierter Roboter. Für ihn wurde der Sound „toy-robot-runs-motor-only-not-on-floor“ gewählt, der vor allem die rotierenden Motoren betont und beim Fahren kontinuierlich abgespielt wird.

Summit ist ein fahrzeugartiger Roboter mit Rädern. Für ihn kommt der Sound „toy-car-pass-by-on-floor“ zum Einsatz, der den Eindruck kleiner Räder auf festem Untergrund vermittelt und beim Rollen dynamisch abgespielt wird.

Janus besitzt mehrere drehbare Metallräder, mit denen er sich fortbewegt. Der Sound „spinning-metal-wheels“ wurde gewählt, um das metallisch-rotierende Geräusch seiner Bewegung hervorzuheben.

6. Studie: Aufbau und Ablauf

Die Studie wurde konzipiert, um die auditive Distanzwahrnehmung in Virtual-Reality-Umgebungen unter Berücksichtigung von Klang-Effekten zu untersuchen, die der Marsatmosphäre nachempfunden sind. Um einen direkten Vergleich innerhalb der virtuellen Realität zu ermöglichen, umfasst die Studie zwei Szenarien: ein Erd-Szenario und ein Mars-Szenario, die nacheinander durchlaufen werden.

Der Ablauf gestaltete sich folgendermaßen: Zunächst wurde der Teilnehmende begrüßt, und die Studienleitung ging eine vorgefertigte Liste durch, um die teilnehmende Person über die Studie aufzuklären. Dabei wurde erklärt, dass die Sounds aus den leuchtenden Kugeln erscheinen würden und dass es an bestimmten Stellen auch vorkommen könne, dass die Testperson nichts hört. Anschließend unterzeichneten die Teilnehmenden eine Einverständniserklärung zur Teilnahme sowie eine Datenschutzvereinbarung. Darüber hinaus wurden personenbezogene Angaben (Alter, Geschlecht, VR-Erfahrung, mögliche auditive Beeinträchtigungen) erfasst. Vor Beginn der eigentlichen Studie erfolgte die technische Einrichtung, bestehend aus dem Aufsetzen des VR-Headsets (Meta Quest 3 S) und der Kopfhörer (Beyerdynamic DT 990 Pro 250 OHM), die über ein Focusrite-Interface mit dem Computer verbunden waren.

Nachdem alle technischen Einstellungen abgeschlossen waren, wurde die Testperson virtuell auf einer Plattform in einer erdähnlichen Umgebung positioniert. Vor ihr schwebten drei gleich große Kugeln, die sich in Abständen von 1 m, 5 m und 15 m befanden. Sobald die Testperson ihre Bereitschaft signalisiert hatte, wurde der erste Klang gestartet. Klang eins bestand aus dem Musikstück „...“. Dieser wurde nacheinander aus den drei Kugeln in den genannten Entfernungen abgespielt, jeweils mit einer Pause von 30 Sekunden dazwischen. Die aktive Kugel war daran erkennbar, dass sie von unten grün aufleuchtete. Nach jeder Klangwiedergabe wurden der Testperson Fragen gestellt: Zum einen, welche Entfernung sie für die jeweilige Klangquelle einschätzen würde, und zum anderen, ob der Klang so wahrgenommen wurde, wie sie es erwartet hatte. Das gleiche Vorgehen wurde anschließend mit Klang zwei wiederholt, bei dem es sich um Klänge, aus einer Fabrik, handelte. Am Ende dieses Erd-Szenarios wurden die Testpersonen zusätzlich gefragt, ob sie die Entfernung tendenziell näher oder weiter eingeschätzt haben und wie sicher sie sich ihrer eigenen Einschätzungen waren. Dieses Szenario diente einerseits dazu, die Teilnehmenden auf die Wahrnehmung von Klangabständen in Virtual Reality zu kalibrieren und andererseits als Vergleichsgrundlage für die Auswertung der Antworten im Mars-Szenario. Nach dem Erd-Szenario wurden die Testpersonen in das Mars-Szenario „geschickt“. In dieser marsähnlichen Umgebung stand die Person erneut auf einer Plattform mit drei Kugeln, die – wie im Erd-Szenario – in den gleichen Abständen angeordnet waren. Zusätzlich befand sich eine weitere Kugel in einem Abstand von 50 m.

Der Ablauf entsprach grundsätzlich dem des Erd-Szenarios, jedoch mit folgenden Veränderungen: Alle Klänge wurden an die akustischen Bedingungen der Marsatmosphäre angepasst. Jeder Abstand wurde mit demselben Klang präsentiert, der sich zweimal hintereinander wiederholte, wobei eine minimale Veränderung hinzu kam – eine auditive Dispersion, ein für den Mars charakteristischer Effekt. Bei jedem Abstand wurde die Reihenfolge zufällig bestimmt, ob der Klang mit Dispersion zuerst oder an zweiter Stelle abgespielt wurde. Die genutzten Effekte werden unter 5.2 Marseffekte beschrieben.

Die Kugel im Abstand von 50 m sollte den Bereich repräsentieren, in dem die Dispersion am deutlichsten wahrnehmbar wäre. Deshalb wurden bei diesem Abstand andere Mars-Effekte, wie etwa die Dämpfungskurve, herausgenommen, um gezielt zu untersuchen, ob den Testpersonen dieser Effekt auffällt. Zu diesem Abstand wurde keine Frage zur geschätzten Entfernung gestellt. Eine zusätzliche Frage nach jedem Abstand überprüfte, ob die Testperson Unterschiede zwischen den beiden aufeinanderfolgenden Klängen wahrgenommen hatte. Da die Dämpfung in der Marsatmosphäre sehr stark ist, war der Klang nur bis zu einer Entfernung von 8 m hörbar. Bei einer Distanz von 15m war der Klang nicht mehr wahrnehmbar, sodass die Testpersonen in diesem Fall eine Schätzung ohne akustische Grundlage abgeben mussten.

7. Auswertung und Ergebnisse

7.1. Ist die Dispersion auf dem Mars hörbar und sichtbar in den Einschätzungen?

Die bereits beschriebene Studie wurde mit folgenden Vorgehensweisen analysiert: nach deskriptiver Statistik, also dem Berechnen von Mittelwert, Median und Standardabweichungen, und zusätzlich durch eine Analyse der Frage, ob die Teilnehmer: innen, welche sich selbst im guten bis sehr guten Bereich eingeschätzt haben, auch bessere Ergebnisse erzielt haben. Bevor mit der Auswertung begonnen werden konnte, mussten allerdings vereinzelte Werte die in Bereichen angegeben wurden überarbeitet werden. Dabei wurde der Mittelwert berechnet und in der Tabellen überschrieben. Mit der deskriptiven Statistik konnten wir die Frage beantworten, ob die vorhandene Dispersion auf dem Mars für das menschliche Gehör überhaupt wahrnehmbar ist. Dazu wurden alle geschätzten Ergebnisse auf dem Mars in „mit Dispersion“ und „ohne Dispersion“ aufgeteilt. Diese Werte wurden pro Kugel mithilfe eines T-Tests verglichen und analysiert. Dieses Verfahren wurde für beide Sounds durchgeführt. Berechnet wurden dabei die Mittelwerte, der T-Wert und die Varianz. Diese Werte haben ein aufschlussreiches Bild zum Vergleich ergeben. Zu Beginn kann festgehalten werden, dass alle berechneten Werte sehr nah beieinander liegen. Die T-Tests sahen wie folgt aus: Siehe Anhang, Fig. 7: T-Test

Die Ergebnisse liegen sehr nah beieinander und unterscheiden sich entweder nur um ein bis zwei Meter oder sogar nur um Kommastellen. Bei zwei von sechs durch die T-Tests analysierten Werten durch die T-Tests wurde die Kugel mit der Dispersion etwas weiter weg eingeschätzt und bei zwei weiteren etwas näher. Bei der 15-Meter-Kugel waren die Ergebnisse bei beiden Sounds identisch, da bei dieser Entfernung aufgrund der atmosphärischen Gegebenheiten Sound nicht mehr hörbar ist. Die Teilnehmer: innen sollten angeben, ab wann man wohl nichts mehr hören kann, ohne das Vorwissen, dass es ab 8 Metern schon nicht mehr möglich ist. Dies erklärt die durchaus hohe Bandbreite an geschätzten Metern und den Faktor, dass die Dispersion ebenfalls nicht mit berücksichtigt werden kann. Wenn man die Mittelwerte der zwei 15m Sounds betrachtet, kann man sehen, dass der erste Sound im Durchschnitt etwas näher geschätzt wurde als der zweite. Der Mittelwert liegt bei Sound 1 bei 213,88 Metern und bei Sound 2 bei 278,72 Metern. Der Median liegt bei beiden bei 50. Der zweite Sound wurde häufiger als lauter beschrieben, vor allem die Sirengeräusche. Dies erklärt den Umstand, dass die Schätzungen im Vergleich zum ersten Sound höher liegen. Allgemein kann man zusammenfassend sagen, dass kein wirklicher Unterschied bezüglich der Dispersion herauszuhören ist.

Auf dem Mars-Level wurde zudem eine zusätzliche Kugel auf 50 Metern hinzugefügt. Bei dieser Kugel wurde die Dämpfungskurve nicht berücksichtigt, da sie sonst nicht hörbar gewesen wäre. Es wurde aus diesem Grund nur abgefragt ob ein Unterschied zwischen der Version mit und ohne Dispersion zu hören ist. Hierbei wurde dann analysiert, ob das Alter der Teilnehmer: innen einen Einfluss darauf hat, ob ein Unterschied zu hören ist oder nicht. Dies wurde ebenfalls mit einem T-Test untersucht. Dabei kam eine Pearson-Korrelation von -0,06 heraus. Es gibt also keine lineare Beziehung zwischen Alter und Angabe. Der Wert ist zwar negativ, allerdings besteht nur eine sehr schwache Tendenz, dass mit steigendem Alter Unterschiede weniger gehört werden. Im Anhang, Fig8 bis Fig10 befinden sich dazu passende Grafiken zur Veranschaulichung. Im folgenden sind insgesamt vier Grafiken zu der Frage, "Ist die Dispersion auf dem Mars hörbar und sichtbar in den Einschätzungen?", abgebildet. Diese beinhalten die einzelnen Antworten der Teilnehmer: innen und die Ergebnisse unterteilt in Dispersion und ohne Dispersion.

Zweistichproben t-Test bei abhängigen Stichproben (Paarvergleichstest)		
	Wie alt sind Sie? (in Jahren angegeben)	Unterschied?
Mittelwert	27,8	0,88
Varianz	97,83333333	0,526666667
Beobachtungen	25	25
Pearson Korrelation	-0,061529485	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	24	
t-Statistik	13,51121449	
P(T<=t) einseitig	5,16524E-13	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,71088208	
P(T<=t) zweiseitig	1,03305E-12	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2,06389562	
0 = nein		
1 = ja		
2 = unsicher		

Fig. 2: T-test

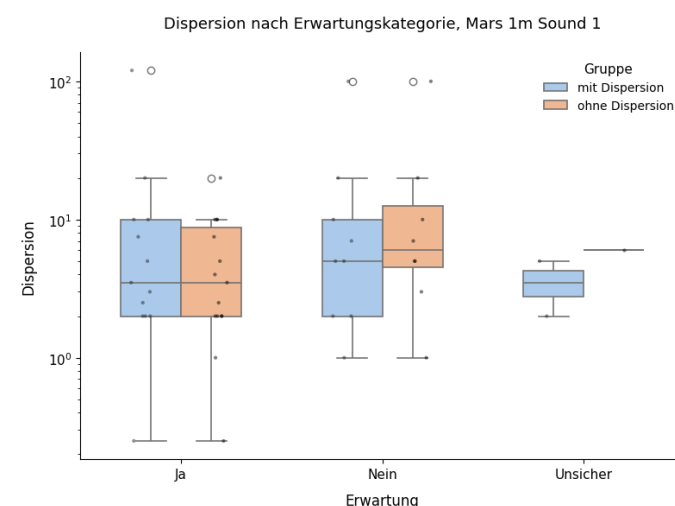


Fig. 3: Mars 1m, Sound 1

7.2. Zusammenhang zwischen Sicherheitsgefühl und Genauigkeit der Schätzungen

Während der Studie wurden die Teilnehmer: innen drei Mal bezüglich ihres Sicherheitsgefühls bezogen auf ihre Schätzungen befragt. Nach den Tests auf der Erde, denen mit dem ersten Sound auf dem Mars sowie denen mit dem zweiten Sound auf

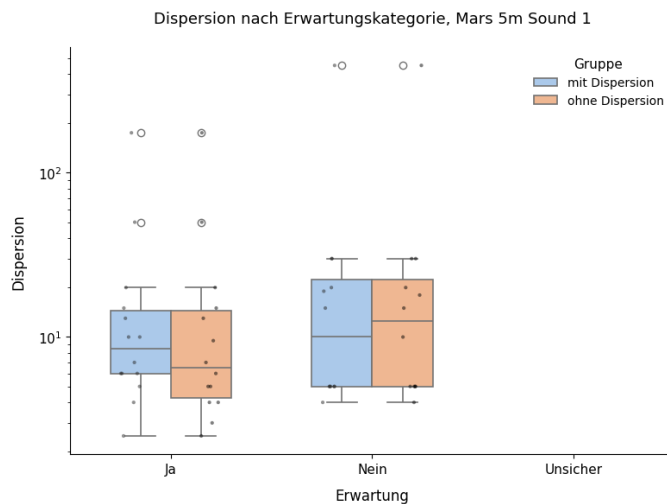


Fig. 4: Mars 5m, Sound 1

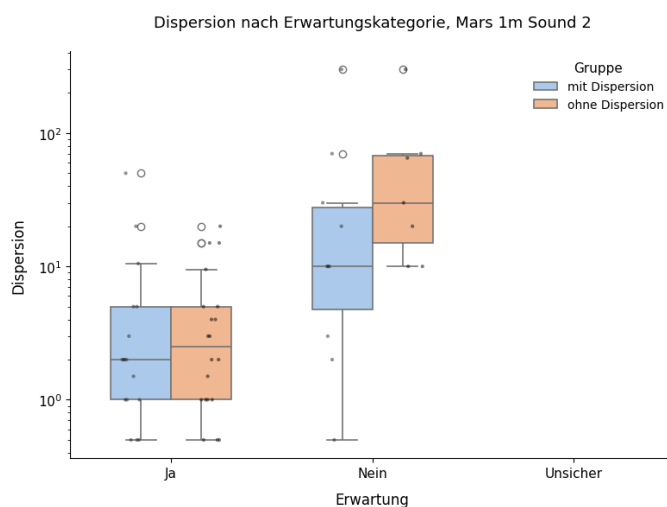


Fig. 5: Mars 1m, Sound 2

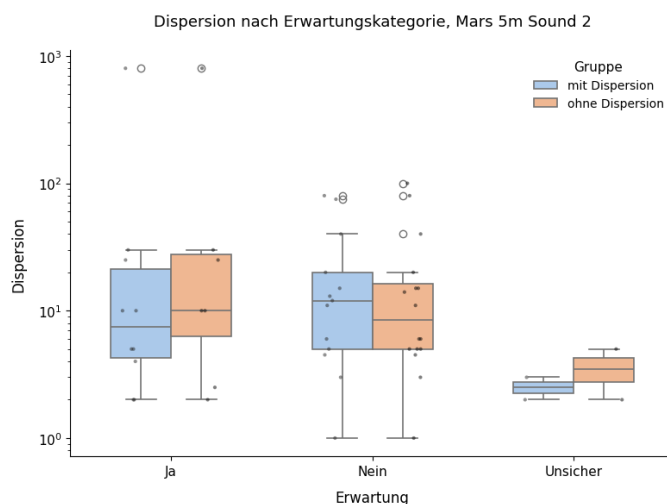


Fig. 6: Mars 5m, Sound 2

sehr unsicher und 5 sehr sicher bedeutete. Mithilfe der Pearson-Korrelationskoeffizienten r sowie dem Bestimmtheitsmaß R^2 lassen sich die Zusammenhänge zwischen dem Sicherheitsgefühl der Teilnehmer und der jeweiligen Schätzgenauigkeit beschreiben. Bei den Tests auf der Erde liegt der r -Wert bei ungefähr -0,4605, es besteht ein moderater negativer Zusammenhang zwischen Sicherheitsgefühl und Schätzgenauigkeit. Tendenziell schätzten also diejenigen, die sich sicherer waren, etwas genauer. Der R^2 -Wert liegt bei 0,212. Das bedeutet, dass 21,2 Prozent der Streuung auf das Sicherheitsgefühl der Teilnehmer: innen zurückzuführen ist. 78,8 Prozent der Streuung hingegen wird von anderen Faktoren beeinflusst. Es gibt also einen erkennbaren, aber nicht sehr starken Zusammenhang zwischen Sicherheitsgefühl und Genauigkeit der Schätzungen. Da der Datensatz zwei starke Ausreißer mit einer durchschnittlichen Abweichung von 103,5m und 414,6666667m aufweist, wurde die Berechnung erneut mit dem bereinigten Datensatz ohne diese beiden Ausreißer durchgeführt. Mit einem Wert von rund 0,3668 ist die negative Korrelation etwas weniger stark zu erkennen, der Zusammenhang ist also weniger deutlich als beim unbereinigten Datensatz. Zudem lassen sich nur noch 13,45 Prozent der Varianz mit dem Sicherheitsgefühl erklären. Es scheint somit auf der Erde zwar einen Einfluss zu haben, jedoch keinen besonders starken. Auf dem Mars beträgt der r -Wert für den ersten Sound rund -0,221, es gibt bei diesen Tests also einen schwachen Zusammenhang zwischen Sicherheitsgefühl und Schätzgenauigkeit. Da allerdings der R^2 -Wert bei gerade einmal rund 0,0488 liegt, ist der Zusammenhang sehr schwach. 95,12 Prozent der Varianz haben andere Gründe. Da der Datensatz wieder einige Ausreißer aufweist, wurde er bereinigt und lediglich die Daten genutzt, bei denen die mittlere Abweichung unter 100 beträgt. Mit r ungefähr -0,2512 und R^2 ungefähr 0,0631 ist der Zusammenhang zwar etwas deutlicher, allerdings noch immer schwach. Teilnehmer: innen mit einem höheren Sicherheitsgefühl waren erneut etwas genauer, jedoch sind die Unterschiede nicht signifikant. Für den zweiten Sound auf dem Mars zeigt sich bei der ersten Berechnung ein deutlicher Unterschied zum ersten. Der Korrelationskoeffizient beträgt hier etwa -0,5568, es wird also ein deutlicher Zusammenhang zwischen den Werten sichtbar. Zudem werden circa 31,1 Prozent der Streuung durch die Sicherheit der Teilnehmer: innen beeinflusst. Bereinigt man allerdings auch hier den Datensatz, zeigt sich ein anderes Bild: mit einem r -Wert von 0,0940 und einem R^2 -Wert von 0,0088 zeigt sich, dass der Zusammenhang zwischen dem Sicherheitsgefühl und der Schätzgenauigkeit erneut zwar vorhanden, allerdings eher gering ist. Somit lässt sich anhand der Datensätze sagen, dass das Sicherheitsgefühl und damit das Selbstbewusstsein zwar einen kleinen Effekt haben kann, allerdings weit weg von einer Garantie für das genaue Schätzen der Entfernungen ist.

8. Fazit

Zusammenfassung der Ergebnisse

Das MARVEL-Projekt hat erfolgreich eine Virtual-Reality-Umgebung geschaffen, die die akustischen Besonderheiten der Marsatmosphäre simuliert und dabei Erkenntnisse über die auditive Wahrnehmung in der Mars Atmosphäre generiert. Die zentrale Forschungsfrage der begleitenden Studie, ob die für den Mars charakteristische akustische Dispersion für das menschliche Gehör wahrnehmbar ist, konnte eindeutig beantwortet werden. Die durchgeführten T-Tests mit den Studiendaten bestätigen die theoretische Vorhersage: Die frequenzabhängige Schallgeschwindigkeit (Dispersion) auf dem

dem Mars mussten sie angeben, wie sicher sie sich mit ihren Einschätzungen auf einer Skala von 1 bis 5 waren, wobei 1

Mars ist unter realistischen Bedingungen für Menschen nicht hörbar wahrnehmbar. Die statistischen Analysen zeigten keine signifikanten Unterschiede in den Entfernungsschätzungen zwischen Klängen mit und ohne Dispersion. Die Mittelwerte der Schätzungen unterschieden sich lediglich um 1-2 Meter oder sogar nur um Kommastellen, was weit unterhalb der Wahrnehmungsschwelle liegt. Aufschlussreich war die Analyse der 50-Meter-Distanz, bei der die Dämpfung entfernt wurde, um den Dispersionseffekt isoliert zu untersuchen. Auch hier zeigte sich kein wahrnehmbarer Unterschied, trotz der weit größeren Entfernung und die Pearson-Korrelation von -0,06 zwischen Alter und Wahrnehmung der Dispersion bestätigte, dass weder das Alter noch andere demografische Faktoren einen Einfluss auf die Erkennbarkeit dieses Effekts haben. Die Altersabhängige Wahrnehmung lässt sich nur mit Einschränkungen untersuchen, da die Probanden mit durchschnittlich 27,8 Jahren, eher jünger waren.

Wissenschaftliche Implikationen und Erkenntnisse für die Marsakustik-Forschung

Die Ergebnisse dieser Studie haben wichtige Implikationen für das Verständnis der Marsakustik und deren praktische Anwendung. Während die Messungen des Perseverance Rovers seit 2021 die physikalische Existenz der akustischen Dispersion auf dem Mars bestätigt haben (Maurice et al., 2022; Chide et al., 2023), zeigt unsere Studie erstmals, dass dieser Effekt für die menschliche Wahrnehmung vernachlässigbar ist. Diese Erkenntnis ist besonders relevant für zukünftige bemannte Mars-Missionen. Astronauten werden die Dispersion nicht als störenden oder verwirrenden Faktor erleben, sondern vielmehr die anderen, dominanteren akustischen Eigenschaften der Marsatmosphäre wahrnehmen: die starke Dämpfung (20 dB leiser als auf der Erde), die frequenzabhängige Absorption hoher Töne und die reduzierte Schallgeschwindigkeit von etwa 240 m/s, wobei letzteres mutmaßlich ebenfalls in den hörbaren Entfernungen nicht wahrnehmbar sein sollte.

Wissenschaftliche Implikationen und Erkenntnisse für die Virtual-Reality-Entwicklung

Aus Sicht der VR-Entwicklung bestätigen die Studienergebnisse die getroffene Designentscheidung, die Dispersion nicht in das finale MARVEL-System zu implementieren. Der erhebliche technische Aufwand, der für die realitätsgetreue Umsetzung dieses Effekts erforderlich gewesen wäre, steht in keinem Verhältnis zum erzielbaren Immersionsgewinn. Stattdessen haben sich die implementierten Mars-spezifischen Audioeffekte als deutlich relevanter erwiesen:

- Der Equalizer-Filter für dumpfere, Mars-typische Klangcharakteristik
- Die angepasste Dämpfungskurve, die Klänge bereits bei geringen Distanzen erheblich abschwächt
- Die umschaltbare Kontrollzentrale für direkte Vergleiche zwischen Mars- und Erd-Akustik

Diese Erkenntnisse sind eine Grundlage für die Entwicklung wissenschaftlich akkurater VR-Anwendungen: Nicht jeder physikalisch messbare Effekt muss implementiert werden – entscheidend ist vielmehr die Fokussierung auf wahrnehmbare und erfahrbare Unterschiede.

Methodische Reflexion und Limitationen

Die Studie wurde erfolgreich durchgeführt und lieferte aufschlussreiche Ergebnisse, dennoch sind einige methodische

Limitationen zu beachten: Stichprobengröße: Die Rekrutierung von Teilnehmern erwies sich als herausfordernder als erwartet, insbesondere während der vorlesungsfreien Zeit. Eine größere Stichprobe hätte die statistische Aussagekraft erhöht und möglicherweise subtilere Effekte sichtbar gemacht.

VR-Umgebung vs. Realität: Obwohl die VR-Simulation auf wissenschaftlichen Daten basiert, können die Simulationen nicht vollständig die Komplexität einer echten Mars-Umgebung mit ihren vielfältigen akustischen Interferenzen, Windgeräuschen und variablen atmosphärischen Bedingungen abbilden. Distanzbereich: Die getesteten Entfernungen von 1-50 Metern decken den für VR-Anwendungen relevanten Bereich ab, jedoch könnten bei größeren Distanzen (>100m) stärkere Dispersionseffekte auftreten. Die starke Dämpfung der Marsatmosphäre macht solche Tests jedoch technisch herausfordernd.

Schlussbetrachtung

Das MARVEL-Projekt leistet einen Beitrag zur noch jungen Forschung der extraterrestrischen Akustik und deren technischen Umsetzung.

Die Erkenntnis, dass die Mars-spezifische akustische Dispersion für Menschen nicht wahrnehmbar ist, mag auf den ersten Blick trivial erscheinen, ist jedoch ein wichtiger wissenschaftlicher Befund. Sie bestätigt, dass bei der Simulation extraterrestrischer Umgebungen der Fokus auf die für Menschen relevanten und erfahrbaren Aspekte gelegt werden sollte – ein Grundsatz, der für die gesamte Entwicklung immersiver Technologien von Bedeutung ist. In einer Zeit, in der die Erforschung des Mars durch Rover und die Planung bemannter Missionen voranschreiten, liefert das MARVEL-Projekt wertvolle Grundlagen für das Verständnis der menschlichen Wahrnehmung in extraterrestrischen Umgebungen. Es zeigt, dass die Zukunft der Weltraumforschung nicht nur in der technischen Eroberung fremder Welten liegt, sondern auch im Verstehen, wie Menschen diese Welten erleben und sich in ihnen orientieren werden.

Die Durchführung der Studie hat trotz der herausfordernden Situation eines kleinen Teams und zwischenzeitlichem Personalwechsel durch Auslandssemester gut funktioniert, was durch eine gute Organisation und Zusammenarbeit möglich geworden ist.

9. Danksagung

Hiermit bedanken wir uns für die Zusammenarbeit und Unterstützung bei:

Prof. Dr. Gabriel Zachmann;

Dr. René Weller;

Navid Mirzayousef Jadid;

Dr. Roland Fischer;

Metasit;

Sabine Dolhs;

M.Sc. Andre Mühlenbrock;

Haya;

Alle Proband:innen der Studie;

vorherige Gruppen, die das Projekt mit aufgebaut hatten;

DLR

10. Literatur

10.1. Internetquellen:

References

- [1] Maurice, S. et al. In situ recording of Mars soundscape. Nature., 2022
<https://www.nature.com/articles/s41586-022-04679-0>, Abrufdatum: 19.09.2025
- [2] Deutsches Zentrum der Luft- und Raumfahrt - Mars-Helikopter "Ingenuity", 2022
<https://www.dlr.de/de/bilder/2020/03/mars-helikopter-ingenuity>, Abrufdatum: 19.09.2025
- 71 [3] Chide, B. Measurements of sound propagation in Mars' lower atmosphere. ScienceDirect., 2023
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X23002133?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=97ab38aaefc86032, Abrufdatum: 19.09.2025
- [4] Banfield, D. et al. The atmosphere of Mars as observed by InSight. Nature Geoscience., 2020
Verfügbar unter: The atmosphere of Mars as observed by InSight | Nature Geoscience
- [5] Petculescu, A. und Lueptow, R. M. Atmospheric acoustics of Titan, Mars, Venus, and Earth. Icarus., 2007
720 Verfügbar unter: Atmospheric acoustics of Titan, Mars, Venus, and Earth - ScienceDirect
- [6] LibreTexts Physics 17.3: Speed of Sound, [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/University_Physics_\(OpenStax\)/Book%3A_University_Physics_I_-_Mechanics_Sound_Oscillations_and_Waves_\(OpenStax\)/17%3A_Sound/17.03%3A_Speed_of_Sound](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/University_Physics_(OpenStax)/Book%3A_University_Physics_I_-_Mechanics_Sound_Oscillations_and_Waves_(OpenStax)/17%3A_Sound/17.03%3A_Speed_of_Sound), Abrufdatum: 19.09.2025
- [7] NASA Science, Sounds of Mars, (Page Last Updated: Nov 18, 2024)
<https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/sounds-of-mars/>, Abrufdatum: 21.09.2025
- 73 [8] Perplexity.ai. Welche Forschungsergebnisse gibt es für Audio auf dem Mars? <https://www.perplexity.ai/search/what-research-is-there-for-aud-ph1VmJhuQyxgiST2JpVjw>, Abrufdatum: 21.09.2025
- [9] Physics 15.43, Katherine Wright Sound Speed Measured on Mars, 2022 <https://physics.aps.org/articles/v15/43>, Abrufdatum: 21.09.2025
- [10] Neper (Hilfsmaßeinheit) [https://de.wikipedia.org/wiki/Neper_\(Hilfsma%C3%9Finheit\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Neper_(Hilfsma%C3%9Finheit)), Abrufdatum: 21.09.2025

11. Anhang 1.1

Mars 5m Sound 2					
mit Dispersion	Bewertung	ohne Dispersion	Bewertung	Zweistichproben t-Test bei abhängigen Stichproben (Paarvergleichstest)	
12 Nein		15 Nein			
25 Ja		25 Ja			
6 Nein		6 Nein		Mittelwert	mit Dispersion 47,34 ohne Dispersion 48,68
2 Ja		2 Ja		Varianz	25023,34833 25077,70583
1 Nein		1 Nein		Beobachtungen	25 25
2 Unsicher		2 Unsicher		Pearson Korrelation	0,999502961
20 Nein		20 Nein		Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0
3 Unsicher		5 Unsicher		Freiheitsgrade (df)	24
75 Nein		100 Nein		t-Statistik	-1,341835096
10 Ja		10 Ja		P(T<=t) einseitig	0,096103933
800 Ja		800 Ja		Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,71088208
13 Nein		14 Nein		P(T<=t) zweiseitig	0,192207867
40 Nein		40 Nein		Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2,059538553
4 Ja		6 Nein			
4,5 Nein		4,5 Nein			
5 Nein		5 Nein			
30 Ja		30 Ja			
80 Nein		80 Nein			
2 Ja		2,5 Ja			
5 Ja		5 Ja			
5 Ja		5 Nein			
3 Nein		3 Nein			
10 Ja		10 Ja			
15 Nein		15 Nein			
11 Nein		11 Nein			

Fig. 7: T-test

Wie alt sind Sie? (in Jahren angeben)

25 Antworten

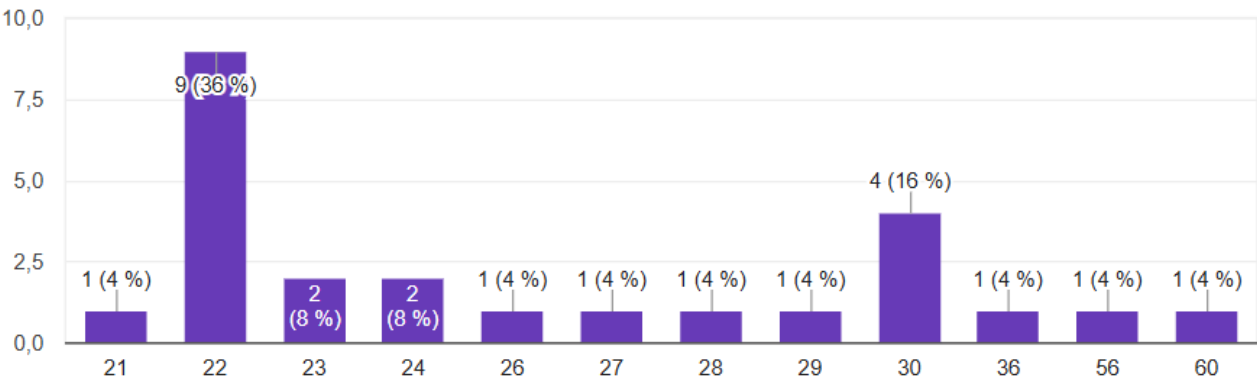


Fig. 8: Alter der Teilnehmer: innen

12. Anhang 1.2

Hört man zwischen den beiden Klängen einen Unterschied? (Mars, 50m, Sound 1)

25 Antworten

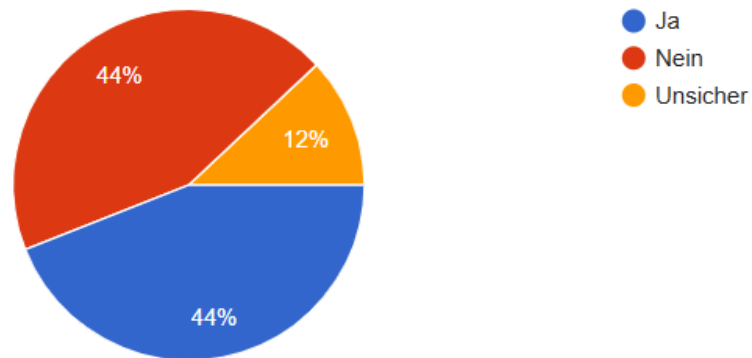


Fig. 9: Unterschied 50m, sound 1

Hört man zwischen den beiden Klängen einen Unterschied? (Mars, 50m, Sound 2)

25 Antworten

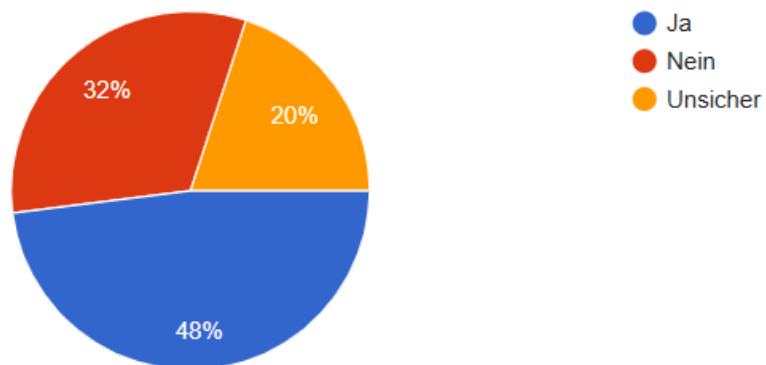


Fig. 10: Unterschied 50m, sound 2