

BACHELOR-THESIS

DIPLOMA Hochschule

Private Fachhochschule Nordhessen

DIPLOMA

Private staatlich anerkannte Hochschule
University of Applied Sciences

Studiengang Mechatronik

Konzeptentwicklung, Umsetzung und Evaluation der Querdynamik eines Fahrradsimulators für eine realitätsnahe, interaktive Simulation

**Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des
akademischen Grades
Bachelor of Engineering (B. Eng.)**

vorgelegt von: Véronique Janssen

Matrikelnummer:

Studienzentrum: Bad Sooden-Allendorf

Bearbeitungszeit: 24 Wochen

Abgabe am: 16.12.2022

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Michael Namokel

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen (einschließlich elektronischer Quellen und dem Internet) direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind ausnahmslos als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht physisch oder elektronisch veröffentlicht.

Sperrvermerk

Die Ausgabe der vorliegenden Bachelorarbeit mit dem Titel „Konzeptentwicklung, Umsetzung und Evaluation der Querdynamik eines Fahrradsimulators für eine realitätsnahe, interaktive Simulation“ ist ausschließlich unter Genehmigung der DLR Institutsleitung TS-VUV zulässig.

Braunschweig, den 16.12.2022

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------|
| Eidesstattliche Erklärung | I |
| Sperrvermerk..... | II |
| Abbildungsverzeichnis..... | V |
| Tabellenverzeichnis..... | VII |
| Abkürzungsverzeichnis | VIII |
| Symbolverzeichnis | X |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Grundlagen und Stand der Technik | 4 |
| 2.1 Simulationen und Simulatoren | 4 |
| 2.2 Studien und Interpretation der Ergebnisse | 6 |
| 2.3 Über die Entwicklung zum heutigen Fahrrad..... | 11 |
| 2.4 Physikalische und mechanische Eigenschaften des Fahrrads..... | 14 |
| 2.5 Dynamikmodelle mit Fokus auf Querdynamik | 17 |
| 3 Weiterentwicklung der Querdynamik des BikeSim | 21 |
| 3.1 Arbeiten anderer Forschungseinrichtungen | 21 |
| 3.2 Aktuelle Umsetzung im BikeSim | 22 |
| 3.3 Konzeptionierung eines verbesserten Lenkers und Lenkverhaltens ... | 26 |
| 3.3.1 Variante 1: Nutzung von auf Messwerten basierenden Interpolationen..... | 26 |
| 3.3.2 Variante 2: Mathematischer Ansatz basierend auf Dynamikmodell30 | |
| 3.4 Konzeptionierung eines verbesserten Lehnens und Lehnverhaltens .. | 31 |
| 3.5 Implementierung der Veränderungen..... | 35 |
| 4 Evaluierung & Validierung der Querdynamik | 36 |
| 4.1 Hypothesen und Fragestellungen | 38 |
| 4.2 Konzipierung der Trainings und Szenarien | 39 |
| 4.3 Durchführung der Studie | 42 |
| 4.4 Bewertung der Studienergebnisse | 43 |
| 4.4.1 Analyse der subjektiven Kriterien..... | 45 |
| 4.4.2 Analyse objektiver Kriterien | 56 |
| 5 Schlussfolgerungen | 60 |

| | | |
|---|----------------------------|-------|
| 6 | Zusammenfassung | 63 |
| 7 | Ausblick | 65 |
| | Literaturverzeichnis | XIII |
| | Anlagenverzeichnis | XVIII |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Struktur / Gliederung der wissenschaftlichen Arbeit | 3 |
| Abbildung 2: Deutsche Übersetzung der Akzeptanzskala nach Van der Laan... 7 | 7 |
| Abbildung 3: Ausschnitt des PQs | 7 |
| Abbildung 4: Deutsche Übersetzung des SSQ..... | 9 |
| Abbildung 5: Deutsche Übersetzung des MISC | 10 |
| Abbildung 6: Draisine oder Laufrad von Karl von Drais | 11 |
| Abbildung 7: Kurbel-Veloziped | 12 |
| Abbildung 8: Starley-Rover-Niederrad mit Porträt von John Kemp Starley | 13 |
| Abbildung 9: Parameter des Fahrradmodells | 14 |
| Abbildung 10: Weitere Parameter des Fahrradmodells | 15 |
| Abbildung 11: Vereinfachtes Fahrradmodell mit Parametern | 16 |
| Abbildung 12: Erweiterte Grundstruktur eines Regelkreises | 17 |
| Abbildung 13: Aufbau des BikeSim | 23 |
| Abbildung 14: Zwei DOF-Bewegungsplattform..... | 24 |
| Abbildung 15: Aufbau der Bremse des BikeSim..... | 25 |
| Abbildung 16: Messvorrichtungen am modifizierten Fahrrad | 27 |
| Abbildung 17: Ausschnitt der Messergebnisse..... | 27 |
| Abbildung 18: Schematische Berechnung des Force Feedbacks Tf | 29 |
| Abbildung 19: PAP des Lenkverhaltens | 31 |
| Abbildung 20: Konzept für Lehnen und Lehnverhalten..... | 33 |
| Abbildung 21: PAP des Lehnverhaltens | 34 |
| Abbildung 22: Training ohne VR..... | 39 |
| Abbildung 23: Training mit VR..... | 40 |
| Abbildung 24: Szenario a.) (links) und Szenario b.) (rechts) | 41 |
| Abbildung 25: Szenario c.) (links) und Szenario d.) (rechts) | 41 |
| Abbildung 26: Szenario e.) (links) und Szenario f.) (rechts) | 41 |
| Abbildung 27: Ablauf der Studiendurchführung | 43 |
| Abbildung 28: VR-Erfahrung der erfolgreich teilgenommenen Probanden | 44 |
| Abbildung 29: Schwere der Reisekrankheit der erfolgreich teilgenommenen Probanden..... | 44 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 30: H1: Auswertung Akzeptanz | 46 |
| Abbildung 31: H1: Auswertung Nützlichkeits- und Zufriedenheitsgrad | 47 |
| Abbildung 32: H3: Auswertung Realismus nach Fahrprofil | 48 |
| Abbildung 33: H3: Auswertung Realismus nach Abschluss | 49 |
| Abbildung 34: H4: Auswertung Präsenzepfinden | 50 |
| Abbildung 35: H5: Auswertung MISC | 50 |
| Abbildung 36: H5: Auswertung SSQ | 51 |
| Abbildung 37: H6: Auswertung Akzeptanz Reihenfolge | 52 |
| Abbildung 38: H6: Auswertung Nützlichkeits- und Zufriedenheitsgrad Reihenfolge | 52 |
| Abbildung 39: H6: Auswertung Realismus Reihenfolge | 53 |
| Abbildung 40: H6: Auswertung Realismus nach Abschluss Reihenfolge | 54 |
| Abbildung 41: H6: Auswertung MISC Reihenfolge | 54 |
| Abbildung 42: H6: Auswertung Präsenzepfinden Reihenfolge | 54 |
| Abbildung 43: H6: Auswertung SSQ Reihenfolge | 55 |
| Abbildung 44: Schematische Darstellung der Zählweise der Lehnvorgänge | 56 |
| Abbildung 45: Heatmap Szenario b)..... | 57 |
| Abbildung 46: Vergleich altes (links) und neues (rechts) Fahrprofil..... | 58 |
| Abbildung 47: Verteilung des Lehnens bei Fahrprofil Alt (links) und Fahrprofil Neu (rechts)..... | 59 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Unterschiede der Fahrprofile | 37 |
| Tabelle 2: Hypothesen zur Untersuchung der Probandenstudie | 38 |
| Tabelle 3: H4: Ergebnisse Präsenzepfinden | 49 |
| Tabelle 4: H5: Ergebnisse MISC | 50 |
| Tabelle 5: H5: Ergebnisse SSQ..... | 51 |
| Tabelle 6: Gesamtanzahl der Lehnvorgänge aller Probanden | 56 |

Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Bedeutung |
|-----------|---|
| B. Eng. | Bachelor of Engineering |
| BLE | Bluetooth Low Energy |
| BMDV | Bundesministerium für Digitales und Verkehr |
| DGL | Differentialgleichung |
| DLR | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt |
| DOF | Degree of Freedom / Freiheitsgrad |
| HMD | Head-Mounted Display / am Kopf befestigte Anzeige |
| KFZ | Kraftfahrzeug |
| LUT | Lookup Table / Zuordnungs- / Wertetabelle |
| MISC | Misery Scale / Elendsskala-Fragebogen |
| MoSAIC | Modular and Scalable Application platform for ITS Components / Multi-User-Simulation zur Erprobung kooperativer Fahrerassistenz |
| PAP | Programmablaufplan |
| PKW | Personenkraftfahrzeug |
| PQ | Presence Questionnaire / Präsenz-Fragebogen |
| SD | Standardabweichung |
| SSQ | Simulation Sickness Questionnaire/ Simulatorkrankheit-Fragebogen |
| TS-VUV | Institut Transportation Systems / Verkehrssystemtechnik |

| Abkürzung | Bedeutung |
|-----------|---|
| VL | Versuchsleitung |
| VP | Versuchsperson |
| VR | Virtual Reality / Virtuelle Realität |
| VRU | Vulnerable Road User / Ungeschützter Verkehrsteilnehmer |

Symbolverzeichnis

| Symbol | Dimension | Erklärung |
|--------------------|-------------------------------|---|
| A bzw. X_A | --- | Vordere Fahrradbaugruppe |
| B bzw. X_B | --- | Hinterrahmen (inklusive Fahrer) |
| $C_{\phi\phi}$ | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ | erster Dämpfungsmatrizenwert |
| $C_{\delta\phi}$ | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ | zweiter Dämpfungsmatrizenwert |
| $C_{\phi\delta}$ | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ | dritter Dämpfungsmatrizenwert |
| $C_{\delta\delta}$ | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ | vierter Dämpfungsmatrizenwert |
| CI | --- | Konfidenzintervall |
| CM_x | --- | Massenschwerpunkt |
| df | --- | zweiter Freiheitsgrad für Konfidenzintervall CI |
| F bzw. X_F | --- | Vorderrad |
| g | $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ | Gravitationskonstante |
| H bzw. X_H | --- | Vorderrahmen (Gabel inklusive Lenker) |
| I_x | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ | Trägheitsmoment |
| $K_{\phi\phi}$ | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ | erster Steifigkeitsmatrizenwert |
| $K_{\delta\phi}$ | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ | zweiter Steifigkeitsmatrizenwert |
| $K_{\phi\delta}$ | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ | dritter Steifigkeitsmatrizenwert |
| $K_{\delta\delta}$ | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ | vierter Steifigkeitsmatrizenwert |
| m_x | kg | Masse |

| Symbol | Dimension | Erklärung |
|--------------------|------------------------------|--|
| $M_{\phi\phi}$ | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ | erster Massenmatrizenwert |
| $M_{\delta\phi}$ | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ | zweiter Massenmatrizenwert |
| $M_{\phi\delta}$ | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ | dritter Massenmatrizenwert |
| $M_{\delta\delta}$ | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ | vierter Massenmatrizenwert |
| n | --- | Stichprobengröße |
| p | --- | Signifikanzniveau |
| R bzw. X_R | --- | Hinterrad |
| s | m | zurückgelegte Strecke basierend auf v und Δt |
| SD | --- | Standardabweichung |
| S_A | $\text{kg} \cdot \text{m}$ | statisches Moment |
| S_F | $\text{kg} \cdot \text{m}$ | Kreiselkoeffizient von F |
| S_T | $\text{kg} \cdot \text{m}$ | Kreiselkoeffizient von T |
| T | Nm | Drehmoment |
| T bzw. X_T | --- | Gesamte Fahrradbaugruppe |
| $T_{B\phi}$ | $\text{Nm} \cdot \text{rad}$ | Aufgebrachtes Drehmoment beim Lehnen |
| t_c | --- | kritischer Wert |
| T_f | Nm | Force Feedback / Gegenmoment Lenker |
| v | $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ | Fahrgeschwindigkeit des Fahrrads |
| w | m | Radstand |
| \bar{X} | --- | Mittelwert |

| Symbol | Dimension | Erklärung |
|-----------------|---------------------------------|--|
| y_P | m | Verschiebung des Kontaktpunktes P in y -Richtung |
| \ddot{y}_P | $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ | Beschleunigung am Kontaktpunkt P in y -Richtung |
| z_B | m | Mittelpunkt von B in z -Richtung |
| z_T | m | Mittelpunkt von T in z -Richtung |
| α | --- | erster Freiheitsgrad für Konfidenzintervall CI |
| δ | rad | Lenkwinkel |
| $\dot{\delta}$ | $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ | Lenkwinkelgeschwindigkeit |
| $\ddot{\delta}$ | $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$ | Lenkwinkelbeschleunigung |
| Δt | s | zeitliche Differenz |
| λ | rad | Kopfwinkel |
| ϕ | rad | Lehnwinkel |
| $\dot{\phi}$ | $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ | Lehnwinkelgeschwindigkeit |
| $\ddot{\phi}$ | $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$ | Lehnwinkelbeschleunigung |
| ψ | rad | Dreh- / Gierwinkel |
| $\dot{\psi}$ | $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ | Dreh- / Gierrate |
| $\ddot{\psi}$ | $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$ | Dreh- / Gierbeschleunigung |

1 Einleitung

„Mir ist es eingefallen, während ich Fahrrad fuhr.“ Albert Einstein (14.03.1879 - 18.04.1955), o. J. - über die Relativitätstheorie.

Was Albert Einstein damals bereits als positiven Nebeneffekt des Draisine-Urenkels empfand, findet auch in der heutigen Zeit immer mehr Anklang. Laut der vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) geförderten Studie des Fahrrad-Monitors Deutschland 2021 ist das Fahrrad bzw. Pedelec das Fortbewegungsmittel mit dem höchsten Wachstumspotenzial, egal ob es als Verkehrsmittel, Sportgerät oder zur Freizeitbeschäftigung dient (Jurczok, 2021, S. 7). Im direkten Vergleich zu einem Personenkraftwagen (PKW) ist es deutlich kostengünstiger, steigert die Gesundheit und ist zudem emissionsfrei. Jedoch steigen durch die vermehrten Fahrradnutzer auch die Unfallzahlen mit ungeschützten Verkehrsteilnehmern (VRU). Seit dem Jahr 2000 nimmt die Anzahl der Unfälle, bei denen Fahrradfahrer leicht- bis schwerverletzt werden, kontinuierlich zu (*BMDV - Unfallverhütungsbericht 2018/2019*, 2021, S. 19).

Daher werden vermehrt Entwicklungen von Fahrsimulatoren, wie bspw. PKW- oder Fahrradsimulatoren, fokussiert, um potenzielle Gefahrensituationen unter wiederholgenauen Bedingungen ohne eine Gefährdung des Fahrers oder VRUs zu simulieren. Des Weiteren dienen Fahrsimulatoren als wichtiges Vorgehen zur Entwicklung von Assistenz- und Automatisierungssystemen für Fahrzeugsysteme. Sie können für Fahrerschulungen und -ausbildungen eingesetzt werden, um das Bewusstsein für Risiken zu schärfen und die allgemeine Verkehrssicherheit zu erhöhen (Schulzyk et al., 2007, S. 323). Mittels Simulatorstudien können Bewertungen der Interaktionen und der (non-verbalen) Kommunikation zwischen mehreren Verkehrsteilnehmern durchgeführt werden, um das Verhalten der Verkehrsteilnehmer zu analysieren (Dialynas et al., 2019, S. 1).

Aus diesen Gründen wurde am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Institut Transportation Systems / Verkehrssystemtechnik (TS-VUV) in

Braunschweig der Fahrradsimulator BikeSim entwickelt, welcher die Möglichkeit bietet, das Verhalten von Fahrradfahrern unter sicheren, kontrollierbaren und reproduzierbaren Voraussetzungen zu analysieren und zu beobachten. Um das Fahrerlebnis so realitätsnah wie möglich zu gestalten, sind diverse Feedback-Systeme im Einsatz, um den Simulator mit der virtuellen Umgebung zu verknüpfen und die Steuermanöver wie das Lenken, Lehnen, Beschleunigen und Bremsen auf die Simulation zu übertragen.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll aufbauend auf der bestehenden Umsetzung des Fahrradsimulators das Konzept hinsichtlich des querdynamischen Force Feedbacks (Krafterückkopplung) überarbeitet und die identifizierten Maßnahmen zur Verbesserung der Querdynamik umgesetzt und bewertet werden. Für die Berechnung des Lenkwiderstands wird derzeit ein dynamisches Modell eines PKW-Lenkrads genutzt und durch einen Servomotor auf den Lenker übertragen. Der dynamische Fahrradsimulator befindet sich auf einer Bewegungsplattform mit zwei Freiheitsgraden (DOF), welche kraftgesteuert ist und durch ein aufgebrachtes Lehnmoment des Fahrradfahrers bewegt werden kann. Der Fokus dieser Arbeit richtet sich dabei auf die softwarebasierte Überarbeitung der Querdynamik. Im weiteren Verlauf soll die erarbeitete Modellierung und Parametrisierung der einzelnen Aspekte durch eine Probandenstudie evaluiert werden. Diese Studie soll sowohl subjektive Kriterien wie Akzeptanz, Präsenz (Immersion) und Simulation Sickness (Simulatorkrankheit) als auch objektive Merkmale wie das Fahrverhalten der einzelnen Probanden prüfen und bewerten.

Um den Simulator und dessen Querdynamik zu verbessern, werden zunächst theoretische Grundlagen zu Simulatoren, Studien und Bewertungen für Simulatoren sowie die Entwicklung zum heutigen Fahrrad und dessen Physik und Mechanik erarbeitet. Im dritten Kapitel werden Arbeiten anderer Forschungseinrichtungen sowie der derzeitige Aufbau und die Parametrisierung des DLR-BikeSim analysiert, ehe mit der Konzeptionierung der verbesserten Querdynamikkomponenten fortgefahren wird. Die erarbeiteten Konzepte und Softwareprogramme werden abschließend in das Gesamtsystem übertragen. Das

darauffolgende Kapitel beschreibt die Evaluierung der implementierten Querdy-
namik-Elemente anhand der Ergebnisse einer Probandenstudie. Hierbei wird
eine Bewertung der Ergebnisse anhand objektiver und subjektiver Kriterien
durchgeführt und mit der aktuellen Simulationsversion verglichen. Somit sollen
entsprechende Rückschlüsse auf die Neuentwicklung gezogen und die über-
greifende Forschungsfrage, ob eine Verbesserung der Simulationsgüte erreicht
wurde, beantwortet werden können. Abschluss dieser Bachelorarbeit werden
die Schlussfolgerungen basierend auf den Ergebnissen der Validierung, eine
übergreifende Zusammenfassung, gefolgt von einem Ausblick auf die weiteren
Entwicklungen des Projektes bilden.

Die Abbildung 1 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die Struktur
dieser Arbeit.

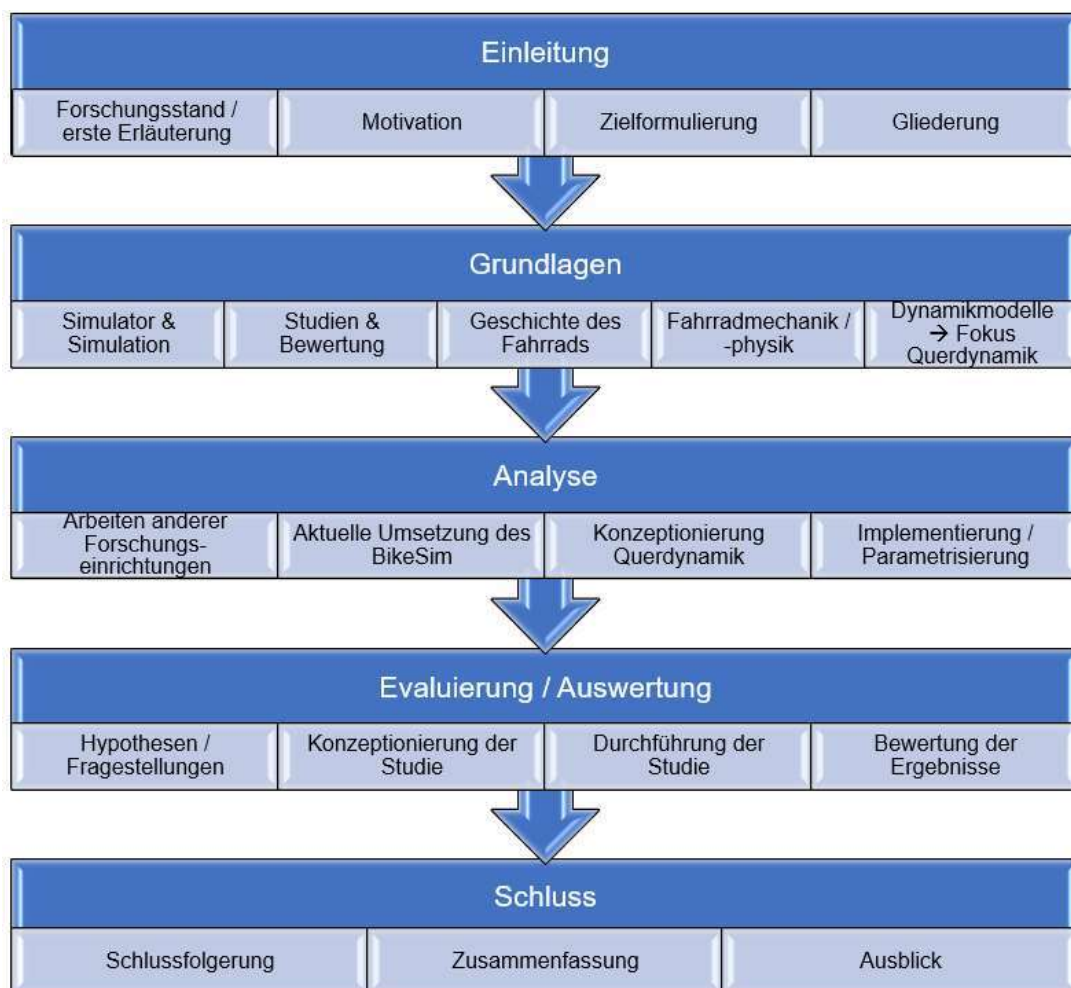


Abbildung 1: Struktur / Gliederung der wissenschaftlichen Arbeit

2 Grundlagen und Stand der Technik

Fahrradsimulatoren und andere Fahrsimulatoren dienen einer verbesserten Entwicklung und Forschung im Verkehrswesen unter sicheren und nachvollziehbaren bzw. wiederholgenauen Bedingungen (Schulzyk et al., 2007, S. 323). Sie ermöglichen die Erforschung und Identifizierung von kritischen und gefährlichen Situationen für VRUs, ohne diese einer Gefahrensituation auszusetzen.

Um einen Fahrradsimulator aufzubauen bzw. zu verbessern, werden zunächst Simulation und Simulator im Allgemeinen und die konkrete Anwendung von Verkehrs- / Fahrsimulatoren betrachtet. Zusätzlich wird die Handhabung einer Studie und Bewertung ihrer Ergebnisse erklärt. Da für die Weiterentwicklung eines Fahrradsimulators die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Fahrrädern und die Einwirkung von Kräften zur Bewegungsrealisierung sowie das wirkende dynamische Modell den größten Einfluss haben, wird der Fokus auf diese Unterkapitel gelegt.

2.1 Simulationen und Simulatoren

Simulationen (Simulationssysteme) sind das Nachbilden eines realen Systems in einem Modell und das anschließende Durchführen experimenteller Untersuchung an diesen Modellen / Systemen, um Erkenntnisse über die Realität zu gewinnen (Sauerbier, 1999, S. 5 und 6). Simulationen werden zumeist dort eingesetzt, wo das Realsystem nicht vorliegt, es zu gefährlich ist oder die Gefahr besteht, dass es bei Experimenten zerstört wird. Vorteilhaft gegenüber analytischen Lösungen ist, dass Simulationen nicht nur für eingeschwungene (stationäre) Zustände, sondern auch für das Einschwingverhalten oder Reaktionen auf Störvorfälle in diesem System genutzt werden können. Des Weiteren finden Simulationen für sehr komplexe Systeme, bspw. Nichtlinearitäten, Anwendung, wo im analytischen Fall diverse Vereinfachungen und somit Abweichungen vom ursprünglichen System durchgeführt werden müssen. Auch

das schnelle und einfache Wechseln verschiedener Konfigurationen des Modells ist hier besonders positiv hervorzuheben. Nachteile bei Simulationen sind jedoch, dass diese zeit- und kostenintensiv sind, da die Entwicklung solcher Modelle arbeitsintensiv und teuer sind und es vor allem bei stochastischen Simulationen zu einer Ergebnisstreuung kommt, welche viele Simulationsdurchläufe und statistische Methoden zur Auswertung erfordert.

Generell sollten Untersuchungen am realen System vorgezogen werden, da es hierbei zu keinen Modellierungsfehlern kommen kann (Sauerbier, 1999, S. 6). Wenn jedoch Experimente unmöglich sind oder es sich um sehr komplexe, nichtlineare Zusammenhänge handelt, ist eine Simulation oftmals das einzige Verfahren, um Rückschlüsse auf ein System zu gewinnen.

Ein Simulator beschreibt hingegen oftmals die Realisierung bzw. die Implementierung des entwickelten Simulationssystems bspw. durch einen mechanischen Aufbau, um den Nutzer in die Simulation einzubinden (Gass & Fu, 2013, S. 1423). Diese Art wird auch physischer Simulator genannt, bei welchem der Anwender Eingaben, wie einer Betätigung von Steuersystemen, die dem realen System ähneln, durchführt und realistische Reaktionen des maschinellen Aufbaus erfahren kann. Diese Reaktionen können visuelle, auditive oder taktile Eindrücke beinhalten. Visuelle und auditive Eindrücke können durch ein Head-Mounted Display (HMD), wie bspw. einer Virtual Reality- (VR) Brille, oder eine Front-Projektion, wo die Simulation auf einem Monitor abgespielt wird, dem Nutzer zugänglich gemacht werden. Taktile Eindrücke können durch eine Reaktion auf die Eingabe des Nutzers, wie bspw. eine Vibration, vermittelt werden. Eine häufige Klassifizierung erfolgt in statischer und dynamischer Ausführung. Ein Computersimulator hingegen bezieht sich auf den zugrunde liegenden Computercode oder die Software zur Umsetzung eines mathematischen Modells. Grundsätzlich beinhalten die physischen Simulatoren einen Computersimulator, um das zuvor erstellte Simulationssystem auf den mechanischen Aufbau übertragen zu können.

Ein konkreter Anwendungsfall für Simulation und Simulatoren ist die Verkehrsforschung. Für fast alle modernen Verkehrsmittel, ganz gleich, ob Individualver-

kehr, wie ein PKW oder Fahrrad, oder öffentlicher Verkehr, wie Busse oder Bahnen, stehen Fahrsimulatoren zur Verfügung (Schulzyk et al., 2007, S. 323). Mit diesen können realistische Verkehrsszenarien, ohne Beschränkung in ihrer Komplexität, unter definierten Laborbedingungen nachgebildet und erforscht werden. Des Weiteren dienen sie zur Untersuchung und Analyse von kritischen und gefährlichen Verkehrssituationen, ohne eine Gefährdung der VRUs zu riskieren.

2.2 Studien und Interpretation der Ergebnisse

Um die Funktionalität, Akzeptanz und Realismus des Simulators und der Simulation zu prüfen, werden Probandenstudien durchgeführt. Durch Befragungen der Probanden bzw. Versuchspersonen (VP) nach dem Experiment können Rückschlüsse u.a. auf die Tauglichkeit des Simulators und der Simulation selbst gewonnen werden. Die Studie wird zumeist als eine Art der Blindstudie durchgeführt, was bedeutet, dass die Probanden lediglich Instruktionen und Verhaltensweisen zum Test, allerdings keine Details der Erprobung / Erforschung erhalten.

Zur Bestimmung der Akzeptanz von Simulatoren wird die Akzeptanzskala nach Van der Laan herangezogen (Van Der Laan et al., 1997, S. 2 und 3). Die Skala beinhaltet insgesamt neun Wortpaare mit jeweils einem positiven und negativen Begriff und einer Bewertung von -2 bis +2. Die Wortpaare aus den Reihen 3, 6 und 8 sind gespiegelt, um bei den Probanden eine höhere Aufmerksamkeit zu genieren (entsprechend sind ihre Bewertungen ebenfalls angepasst). Anhand der vorliegenden Berechnungsvorschrift können dann aus den Mittelwerten der Angaben der Reihen 1, 3, 5, 7 und 9 ein Nützlichkeitsfaktor und der Angaben der Reihen 2, 4, 6 und 9 ein Zufriedenheitsfaktor ermittelt werden (Van Der Laan et al., 1997, S. 9). Die verwendete deutsche Übersetzung der Akzeptanzskala mit den Bewertungspunkten ist in Abbildung 2 dargestellt.

| | | | | | | |
|---------------------|----|----|---|----|----|---------------|
| nützlich | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | nutzlos |
| angenehm | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | unangenehm |
| schlecht | +2 | +1 | 0 | -1 | -2 | gut |
| nett | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | nervig |
| effizient | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | unnötig |
| ärgerlich | +2 | +1 | 0 | -1 | -2 | erfreulich |
| hilfreich | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | wertlos |
| nicht wünschenswert | +2 | +1 | 0 | -1 | -2 | wünschenswert |
| aktivierend | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | einschläfernd |

Abbildung 2: Deutsche Übersetzung der Akzeptanzskala nach Van der Laan

Um die Immersion bzw. das Präsenzgefühl der Probanden zu ermitteln, wird der Presence Questionnaire (Präsenz-Fragebogen) (PQ) nach Witmer und Singer verwendet (Witmer & Singer, 1998, S. 225). Präsenz beschreibt die subjektive Empfindung, sich an einem Ort oder in einer Umgebung zu befinden, wenn man sich physisch gesehen an einem anderen Ort aufhält. Des Weiteren erfordert Präsenz eine konzentrierte Aufmerksamkeit und beruht auf der Interaktion zwischen sensorischen Reizen (visuell, auditiv oder taktil) und Umgebungsfaktoren aus der Simulation, um ein Eintauchen in die VR-Simulation zu ermöglichen. Je höher das Präsenzgefühl, desto mehr hat der Proband das Gefühl in der Simulation zu sein. Ein Ausschnitt des übersetzten PQ ist in Abbildung 3 sichtbar, der gesamte PQ ist im Anhang C zu finden.

| | | | | | |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Gar Nicht | | Etwas | | Vollständig |
| Wie sehr konnten Sie die Ereignisse kontrollieren? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| | Reagiert nicht | | Reagiert moderat | | Reagiert sehr gut |
| Wie reagierte die Umgebung auf Aktionen, die Sie initiiert (oder durchgeführt) haben? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| | Extrem künstlich | | An der Grenze | | Ganz natürlich |
| Wie natürlich erschienen Ihnen die Interaktionen mit der Umgebung? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Abbildung 3: Ausschnitt des PQs

Zusätzlich zum PQ und Akzeptanzfragebogen nach Van der Laan ist auch das Gefühl von realistischen Eindrücken der Probanden in der Simulation und mit dem Simulator ein wichtiger Aspekt für die Bewertung. Aus diesem Grund werden für den zu überprüfenden Simulator bzw. die zu prüfende Eigenschaft individuelle Fragebögen erstellt, welche durch Diskussionen validiert und somit auf den jeweiligen Anwendungsfall zugeschnitten sind. Die einzelnen Fragen zum Thema Realismus werden durch eine siebenstufige Likert-Skala zur Messung der persönlichen Einstellung des Probanden bewertet (Likert, 1932, S. 7). Die Aussagen sind dabei so aufgesetzt, dass die Antwortenden diesen mehr oder weniger stark zustimmen oder verneinen können. Zusätzlich werden zumeist auch Freifelder bei diesen Fragebögen eingefügt, um das persönliche Fazit weiter fokussieren und auch weitere Punkte sammeln zu können.

Ebenfalls dienen die Studien zur Ermittlung der Simulation Sickness bzw. Simulatorkrankheit. Diese Erkrankung ist eine Variante der Bewegungs-krankheiten, zu welchen auch Reisekrankheiten wie Seekrankheit gehören (Kuiper et al., 2019, S. 82). Die auftretenden Symptome sind in den meisten Fällen ähnlich und drücken sich u.a. durch Schwindel, Kopfschmerzen, starkes Schwitzen bis hin zur Übelkeit und möglichem Erbrechen aus. Während Reisekrankheiten meist durch vestibuläre Reize ausgelöst werden, ist bei der Simulatorkrankheit das Fehlen dieser Reize der Hauptgrund. Hintergrund hierfür liefert die Sensorkonflikt-Theorie von Reason (Reason, 1978, S. 820). Diese führt die auftretenden Symptome auf Widersprüche in der multisensorischen Verarbeitung zurück, wobei für die Simulatorkrankheit meist ein Konflikt zwischen den vestibulären und visuellen Reizen vorliegt. Zur Messung der Simulatorkrankheit wird der von Kennedy u.a. erstellte Simulator Sickness Questionnaire (Simulatorkrankheit-Fragebogen) (SSQ) verwendet (Kennedy et al., 1993, S. 203). Eine vierstufige Likert-Skala („gar nicht“ bis „schwer“) misst insgesamt 16 Symptome und anhand der vorgegebenen Berechnungsvorschrift können daraus drei Faktoren zur Abschätzung des Unwohlseins (Übelkeit, Desorientierung und Okulumotorik) sowie eine Gesamtpunktzahl ermittelt werden (Kennedy et al., 1993, S. 206 und 207). Die genutzte deutsche Übersetzung des SSQ befindet sich in Abbildung 4.

| | Gar Nicht | Leicht | Mittel | Schwer |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Allgemeines Unwohlsein | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Erschöpfung | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Kopfschmerzen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Gereizte Augen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Probleme scharf zu sehen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Erhöhter Speichelfluss | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Schwitzen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Übelkeit | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Konzentrationsschwierigkeiten | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Kopfdrücken | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Verschwommener Blick | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Benommenheit (mit offenen Augen) | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Benommenheit (mit geschlossenen Augen) | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Schwindel | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Flaes Gefühl im Magen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Aufstoßen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Abbildung 4: Deutsche Übersetzung des SSQ

Young u.a. fanden durch Studien heraus, dass die Symptome der Simulator-krankheit um bis zu 80 % ansteigen, wenn der SSQ als Ausgangspunkt für die Studie (vor den eigentlichen Tests) eingesetzt wird (Young et al., 2006, S. 99 und 100). Hintergründe dieses Anstiegs sind u.a. (Young et al., 2006, S. 101):

- Ein negativer psychologischer Einfluss während der VR-Erfahrung: Beantwortung der Fragen kann den Probanden vermitteln, dass tatsächlich eine Übelkeit ausgelöst werden soll und sie somit erwarten, krank zu werden.
- Die Probanden könnten mehr Symptome angeben als sie empfinden, um die Erwartungen hinsichtlich einer mutmaßlichen Zunahme der Übelkeit zu erfüllen.

Daher wird im Vorfeld der Testfahrten der Misery Scale (Elendsskala-Fragebogen) (MISC), welcher u.a. von Bos (Bos et al., 2006, S. 1112) und

Wertheim (Wertheim et al., 1998, S. 522) genutzt und validiert wurde, herangezogen. Diese Elf-Punkte-Skala kann in kurzer Zeit (auch verbal) ausgefüllt werden, ohne dass eine Übelkeit schneller hervorgerufen wird als beim SSQ. Dies liegt an der Reihenfolge der Skala, welche auf Grundlage der Erkenntnisse gebildet wurde, dass einer auftretenden Übelkeit andere Symptome wie Schwindel, allgemeines Unwohlsein, Kopfschmerzen und Schwitzen vorausgehen (Bos et al., 2006, S. 1112). Die angewandte deutsche Übersetzung der MISC ist in Abbildung 5 beschrieben.

Bitte geben Sie an ob Sie unter einem der folgenden Symptome leiden.

| | |
|----|---|
| 1 | Unwohlsein |
| 2 | Kaum spürbares Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen |
| 3 | Leichtes Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen |
| 4 | Deutliches Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen |
| 5 | Starkes Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen |
| 6 | Leichte Übelkeit |
| 7 | Deutliche Übelkeit |
| 8 | Starke Übelkeit |
| 9 | Übelkeit mit (beinahe) Würgen |
| 10 | Sich übergeben müssen |
| 0 | Keine Probleme |

Abbildung 5: Deutsche Übersetzung des MISC

2.3 Über die Entwicklung zum heutigen Fahrrad

Das Fahrrad durchlief mehrere Entwicklungsstände, bis es zu dem heutigen, durch Muskelkraft angetriebenen, Einspurfahrzeug, mit zwei Rädern und zwischen den Reifen angeordneten Pedalen, wurde. Des Weiteren ist erwähnenswert, dass viele der „Zwischenstände“ zum Fahrrad von verschiedenen Personen nahezu zeitgleich und an verschiedenen Orten entwickelt wurden (Lessing & Hadland, 2021, S. 20, 43, 49, 156 und 186). Durch diesen Umstand wird im weiteren Verlauf des Kapitels nur auf die bekanntesten Vertreter der jeweiligen Erfindungen eingegangen, die im heutigen Fahrrad noch bestehend sind. Außerdem sind einige Komponenten im Laufe der Jahre zunächst hinzugefügt und wieder entfernt worden, um sie letztendlich doch zu nutzen. Daher kann die Entwicklung des Fahrrads wie folgt beschrieben werden:

„Es ist eine eigenartige Tatsache in der Geschichte des Fahrrades, daß [sic!] fast alle Verbesserungen zwei- ja zuweilen dreimal erfunden werden mußten [sic!], bevor sie allgemein verwendet wurden.“ (Croon, 1939, S. 167)

Als Beginn des Fahrrads wird die Entwicklung des Laufrads „Draisine“ (Abbildung 6) (Limebeer & Sharp, 2006, S. 35) durch den deutschen Erfinder Karl von Drais im Jahre 1817 angenommen (Lessing & Hadland, 2021, S. 10).



Abbildung 6: Draisine oder Laufrad von Karl von Drais

Es wurde spekuliert, dass das Laufrad auf Drais' ursprünglicher Erfindung „Fahrmaschine Zwei“ basierte, welche aus jeweils zwei Vorder- und Hinterrädern und einer geschmiedeten Kurbelwelle bestand (Lessing & Hadland, 2021, S. 8). Der Aufbau der „Fahrmaschine Zwei“ ermöglichte dem Fahrer bei der Vorwärtsbewegung durch Betätigung / Treten der Kurbelwelle in Fahrtrichtung zu sitzen. Allerdings ist das Laufrad laut Drais' eigener Aussage das Schlittschuhlaufen als Inspiration genutzt worden, die im Badwochenblatt für die Stadt Baden zu finden war (Lessing & Hadland, 2021, S. 10).

Im weiteren Verlauf wurde durch den Franzosen Pierre Michaux der Tretkurbelantrieb im Jahr 1861 wiedereingeführt (Limebeer & Sharp, 2006, S. 35). Als ein Kunde eine defekte Draisine in seine Werkstatt brachte, instruierte er seinen Sohn Ernest, dass er Pedale an das Vorderrad anbringen soll. Dies war der Startschuss für die Entwicklung des zweirädrigen Velozipeds. Die erste Generation des Michaux-Velozipeds hatte noch die Ähnlichkeit zu einer Laufmaschine, wurde jedoch mit Pedalen und einer Kurbel am deutlich größeren Vorderrad ausgestattet (Lessing & Hadland, 2021, S. 63). Durch einen abgesenkten Rahmen war der Fahrer in der Lage, den Boden mit den Füßen zu erreichen, um so das Balancieren auf dem Fahrzeug zu erlernen. Allerdings wurde durch diesen tieferliegenden Sitz das Treten der Pedale erschwert (Lessing & Hadland, 2021, S. 65). Die zweite Generation unterschied sich in der Rahmenform, welche den Fahrer so hoch sitzen ließ, dass die Benutzung der Pedale ergonomischer und deutlich einfacher, zum Aufsitzen und Losfahren jedoch Hilfe einer weiteren Person benötigt wurde. Ein Kurbel-Veloziped der zweiten Generation ist in Abbildung 7 ersichtlich.



Abbildung 7: Kurbel-Veloziped

Bei beiden Varianten des Kurbel-Velozipeds mussten hohe Schafstiefel getragen werden, da das Vorderrad an den Beinen des Fahrers scheuerte. Zudem war gerade die zweite Generation anfällig für ein Umkippen beim Aufsteigen und Losfahren.

Um diese Sicherheitsmängel zu beseitigen, wurden im Jahre 1884 verschiedene Niederräder präsentiert, welche den Kurbelantrieb mittig zwischen den beiden Rädern besaß und dieser das Hinterrad antrieb (Lessing & Hadland, 2021, S. 158). Das wohl berühmteste Niederrad wurde 1885 von John Kemp Starley hergestellt, welches mit seinem Erfinder in Abbildung 8 ersichtlich ist (Lessing & Hadland, 2021, S. 159).

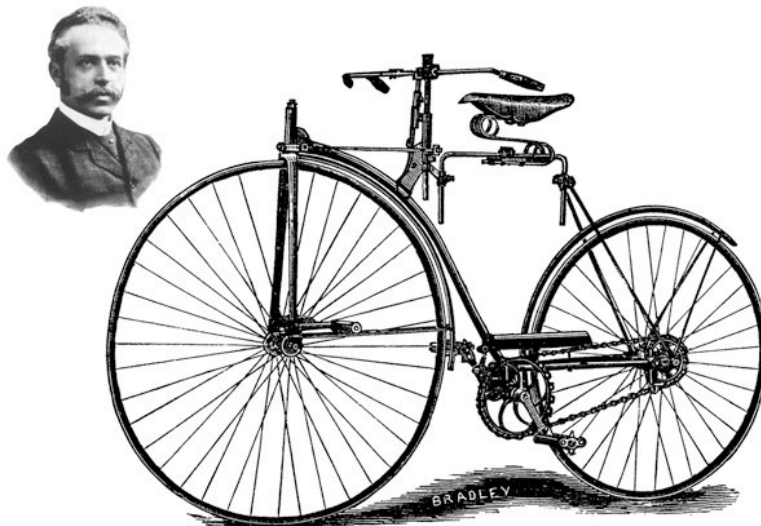


Abbildung 8: Starley-Rover-Niederrad mit Porträt von John Kemp Starley

Durch die neue Anordnung wurde die Gefahr von Verletzungen durch das Vorderrad vollständig gebannt und der positive Effekt der tieferliegenden Pedale für eine ergonomischere Benutzung des Fahrrads hervorgehoben.

Der letzte Schritt zur grundlegenden Entwicklung des heutigen Fahrrads war die Innovation des Luftreifens, welcher im Jahr 1888 von John Boyd Dunlop patentiert wurde (Lessing & Hadland, 2021, S. 186). Bereits ein Jahr danach wurde seine Wirksamkeit im Rennsport praktiziert.

2.4 Physikalische und mechanische Eigenschaften des Fahrrads

Um das Fahrrad und das Gleichgewicht bei dessen Fahrt in einer Simulation darzustellen, sind genaue Abmessungen und festgelegte Parameter für eine realitätsnahe, dynamische Modellierung zwingend notwendig (Moore *et al.*, 2010, p. 1). Änderungen der Parameter können das dynamische Modell des Fahrrads und dessen Fahrverhalten beeinflussen, welches für verschiedene Konfigurationen zur Erprobung des zu entwickelnden Modells vorteilhaft sein kann. Typischerweise werden vier starre Teilkomponenten / -geometrien für das Fahrradmodell angenommen: einem Hinterrahmen inklusive des Fahrers B , einem Vorderrahmen bestehend aus einer Gabel inklusive Lenker H , einem Hinterrad R und einem Vorderrad F ; die Eigenschaften der gesamten Baugruppe werden mit T gekennzeichnet (Meijaard *et al.*, 2007, S. 2). Zudem werden die Gelenke als ideal rollend und reibungsfrei und das System als symmetrisch in Längsrichtung angenommen (Moore *et al.*, 2010, S. 1). Um die Geometrie eines Fahrrads zu bestimmen, sind in der Abbildung 9 und Abbildung 10 (in Anlehnung an Åström *et al.*, 2005, S. 28; Meijaard *et al.*, 2007, S. 2) die markanten Parameter eingezeichnet und werden im Weiteren definiert:

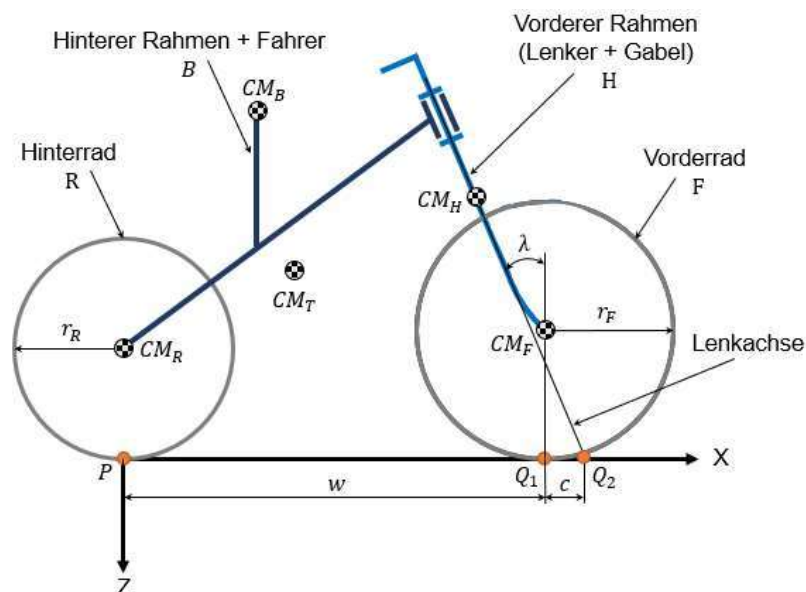


Abbildung 9: Parameter des Fahrradmodells

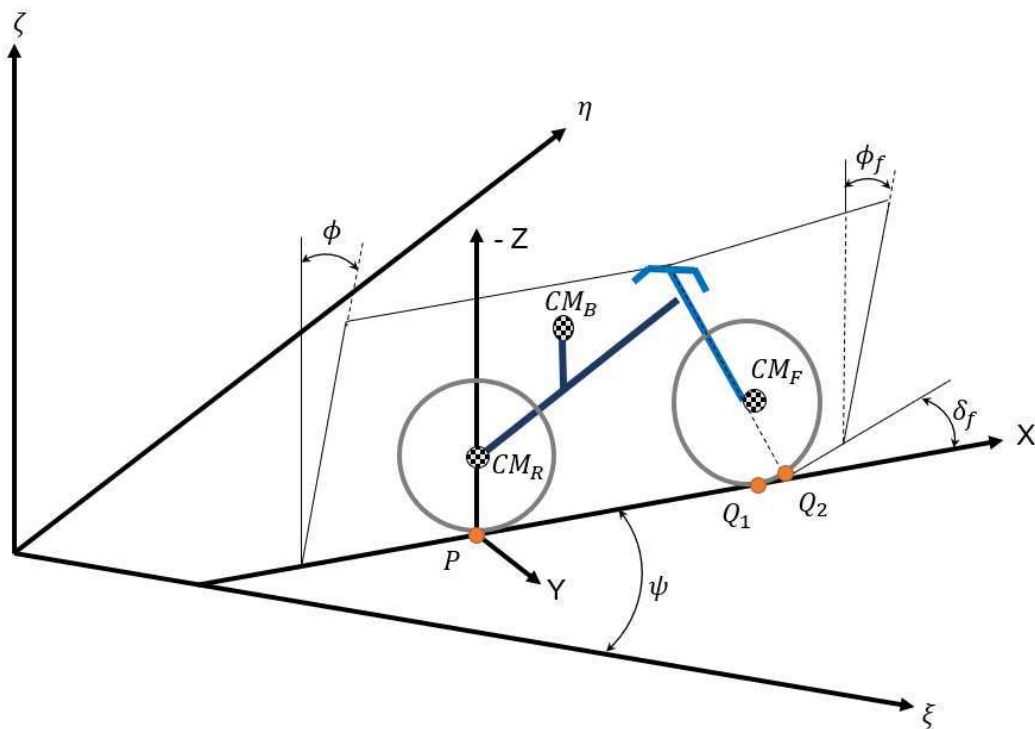


Abbildung 10: Weitere Parameter des Fahrradmodells

Die Punkte P (am Hinterrad) und Q_1 (am Vorderrad) sind die Auflagepunkte zwischen dem jeweiligen Reifen und dem Untergrund, indessen beschreibt Punkt Q_2 den Schnittpunkt zwischen der um den Kopfwinkel λ geneigten Lenkachse und der horizontalen Ebene (Åström et al., 2005, S. 28). Der Abstand zwischen den Punkten Q_1 und Q_2 wird als Nachlauf c bezeichnet, welcher einen großen Einfluss auf die Lenkung und die Stabilität des Fahrrads hat. Je größer der Nachlauf c , desto größer die Stabilität und kleiner die Lenkagilität. Typische Werte für den Nachlauf c sind 0,03–0,08 m. Der Abstand zwischen den Punkten P und Q_1 definiert die Länge des Radstands w . Die Massenschwerpunkte der jeweiligen Teilkomponenten sind mit CM gekennzeichnet, wobei der Massenschwerpunkt der gesamten Baugruppe mit CM_T deklariert ist. Der hintere Lehnwinkel ϕ wird positiv, wenn das Fahrrad nach rechts gelehnt wird, ebenso für der Lehnwinkel der Gabel ϕ_f (Meijaard et al., 2007, S. 3). Der Lenkwinkel δ und der effektive Lenkwinkel δ_f werden bei einer Drehung des Lenkers nach rechts ebenfalls positiv angenommen. Die Verdrehung des Fahrrads im Raum wird durch den Dreh- / Gierwinkel ψ beschrieben.

Ein vereinfachtes Fahrradmodell ist in Abbildung 11 dargestellt (in Anlehnung an Åström et al., 2005, S. 29).

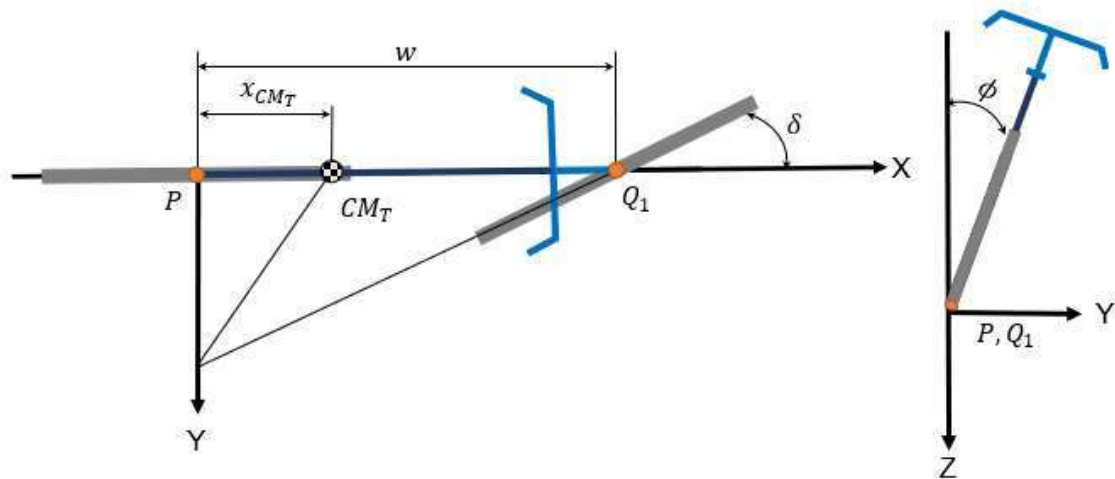


Abbildung 11: Vereinfachtes Fahrradmodell mit Parametern

Durch die Annahme, dass der Kopfwinkel $\lambda = 0^\circ$ ist, womit auch der Nachlauf $c = 0$ m beträgt, kann der effektive Lenkwinkel δ_f durch den Lenkwinkel δ bestimmt werden. Ebenso gilt dies für den Lehnwinkel der Gabel ϕ_f , welcher durch den hinteren Lehnwinkel ϕ ersetzt wird. Da die Position als relativ zum XYZ-Koordinatensystem betrachtet wird, entfällt der Dreh- / Gierwinkel ψ und wird durch eine Dreh- / Gierwinkelgeschwindigkeit $\dot{\psi}$ ersetzt. Diese errechnet sich wie folgt:

$$\dot{\psi} = \frac{v \cdot \delta}{x_{CM_T}} \quad (1)$$

Hierdurch sind nur noch zwei Winkel für eine Modellierung notwendig: Der Lenkwinkel δ als Eingabevariable bzw. Führungsgröße und der Lehnwinkel ϕ als DOF.

Die dargestellten Parameter und Teilsysteme sind für ein Dynamikmodell von großer Bedeutung. Im nächsten Kapitel dieser Arbeit werden sowohl die komplexe Modellierung nach Whipple durch Meijaard et al. (Meijaard et al., 2007, S. 1 bis 63) als auch eine vereinfachte dynamische Modellierung durch Åström et al. (Åström et al., 2005, S. 26 bis 47) aufgegriffen und erklärt.

2.5 Dynamikmodelle mit Fokus auf Querdynamik

Ein Dynamikmodell bzw. dynamisches System (auch Regelung oder Regelkreis genannt) ist ein mathematisches Modell eines zeitabhängigen Prozesses (Differentialgleichungen (DGL)) (Lunze, 2013, S. 2). Man unterscheidet zwischen den Eingangsgrößen bzw. Führungsgrößen, die auf das System einwirken und die zeitliche Veränderung des Systems bewirken und den Ausgangsgrößen, welche eine Reaktion der Eingangs- / Führungsgrößen darstellen. Ein dynamischer Prozess beschreibt hingegen die Veränderungen innerhalb des dynamischen Systems. Daher kann man ein dynamisches System als Teil der Welt auffassen, in dem die dynamischen Prozesse ablaufen. Dynamische Systeme können für unterschiedliche Prozesse aus verschiedenen Bereichen eingesetzt werden, wie bspw. der Elektrotechnik, Mechanik, Physik und Mathematik. Die erweiterte Grundstruktur eines dynamischen Systems bzw. eines Regelkreises ist der Abbildung 12 zu entnehmen, welche die zusätzlichen dynamischen Eigenschaften des Messgliedes beinhaltet (Lunze, 2013, S. 5).

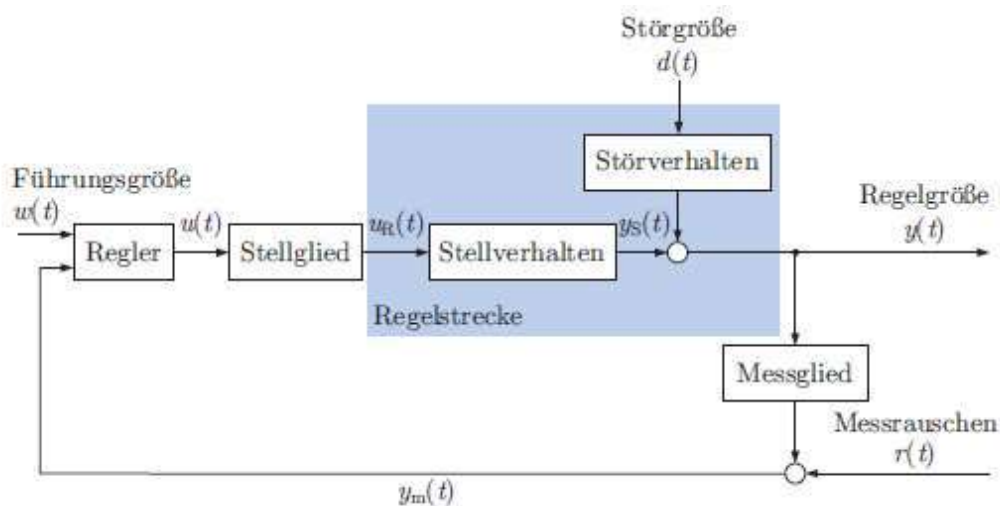


Abbildung 12: Erweiterte Grundstruktur eines Regelkreises

Für die Entwicklung eines mathematischen Fahrradmodells sind die im vorherigen Kapitel definierten Teilkomponenten (Hinterrahmen inklusive des Fahrers B , Vorderrahmen bestehend aus einer Gabel inklusive Lenker H , Vorderrad F und Hinterrad R), die gesamtheitliche Baugruppe T und vorliegenden Parameter

zu betrachten. Für einfache Dynamikmodelle sind die Massen und Abmaße der einzelnen Teilkomponenten sowie Verteilung dieser in Bezug auf ein festgesetztes Koordinatensystem ausreichend. Komplexe Systeme berücksichtigen zusätzlich Reifeneigenschaften, Fahrereigenschaften wie Größe und Gewicht, Steifigkeit der einzelnen Teilbereiche, etc. (Moore et al., 2010, S. 1). Die zentrale Komponente für die Entwicklung eines realitätsnahen Simulators ist die dynamische Modellierung zwischen Fahrer und Fahrrad (Yin & Yin, 2006, S. 160). Die Erstellung des Fahrer-Fahrrad-Systems ist allerdings eine anspruchsvolle Aufgabe, welche durch die drei folgenden Faktoren begründet ist:

- Das Fahrrad ist ein zweirädriges Einspurfahrzeug, welches in mehrere Richtungen frei bewegbar ist, d.h. es ist ein System mit vielen DOFs.
- Die Straßenverhältnisse sind ortsabhängig und die Reaktionen zwischen Reifen und Straße sind noch nicht vollständig erforscht.
- Das Fahrrad ist in Längsrichtung instabil und nur in einer Vorwärtsbewegung unter Kontrolle eines Fahrers, dessen Verhalten nicht vorhersehbar und individuell ist, stabil.

Für ein vereinfachtes Dynamikmodell (basierend auf Abbildung 11 in Kapitel 2.4) werden diese zusätzlichen versimpelnden Annahmen / Bedingungen getroffen (Åström et al., 2005, S. 28):

- Das Fahrrad fährt auf einer horizontalen Ebene.
- Die Vorwärtsgeschwindigkeit am Hinterrad ist konstant.
- Die Position des Fahrradfahrers auf dem Fahrrad ist fixiert, wodurch der Lehnwinkel des Fahrers dem Lehnwinkel des Fahrrads entspricht.
- Die Lenkachse hat einen Kopfwinkel von $\lambda = 0^\circ$, weshalb auch der Nachlauf $c = 0$ m beträgt.

Aus diesen Annahmen und der vereinfachten geometrischen Abhängigkeit des Fahrrads wird ebenfalls der Grad der DGLs des Dynamikmodells reduziert, sodass nur noch DGLs zweiter Ordnung vorliegen. Die Herleitung der folgenden Gleichung basiert auf den Angaben nach Åström et al., 2005, die hier nicht

dargestellt werden. Die Gleichung des geschlossenen Regelkreises lautet wie folgt (Åström et al., 2005, S. 29):

$$I \frac{d^2\phi}{dt^2} + \frac{Dvk_2}{w} \cdot \frac{d\delta}{dt} + \left(\frac{mv^2z_T}{w} - mgz_T \right) \cdot \phi = 0 \quad (2)$$

Dieses System ist asymptotisch stabil, wenn (und nur wenn) $k_2 > \frac{w \cdot g}{v^2}$ ist, was der Fall ist, wenn die Fahrgeschwindigkeit v entsprechend groß ist. Leider wird bei dem vereinfachten Modell der Einfluss der vorderen Fahrradbaugruppe H nicht abgebildet, welcher sich aber wesentlich auf die Fahrraddynamik auswirkt (Åström et al., 2005, S. 30).

Für das komplexe Dynamikmodell wird die Betrachtung nach Meijaard et al., 2007 herangezogen. Dieses Modell beschreibt die minimalen Annahmen nach Whipple und inkludiert alle klar definierten Starrkörpereffekte und die Trägheitseigenschaften der Räder, lässt jedoch eine Vielzahl von Eigenschaften bei der Betrachtung außen vor (Meijaard et al., 2007, S. 6). So entfallen bspw. das Reaktionsvermögen und Steuerreflexe des Fahrers, welche durch Moore detailliert definiert und beschrieben wurden (Moore, 2012).

Das Modell beinhaltet 25 Parameter, welche teilweise auf den Messwerten realer Fahrräder basieren, andere sind überhöht dargestellt, um einen Nachweis in der Berechnung zu gewährleisten (Meijaard et al., 2007, S. 6). Insgesamt hat es sieben DOFs, die sich durch die vier Teilkomponenten mit je drei translatorischen und rotatorischen DOFs abzüglich der drei Gelenkpunkte mit jeweils fünf DOFs und des Kontaktpunktes beider Räder ergeben (Meijaard et al., 2007, S. 8):

$$4 \cdot (3 + 3) - 3 \cdot 5 - 2 = 7 \quad (3)$$

Durch weitere Vereinfachungen können die DOFs auf drei reduziert werden, wovon ein DOF eine Abhängigkeit zum Lenkwinkel δ beinhaltet, sodass nur zwei DOFs zur Berechnung des dynamischen Systems als Eingabevariablen bestehen bleiben (Meijaard et al., 2007, S. 14 und 24). So ergibt sich eine Grundgleichung, aus welcher sich DGLs zur Bestimmung des auftretenden

Gegenmoments am Lenker / Force Feedback T_f und die Lehngleichung herleiten lassen.

Grundgleichung (Meijaard et al., 2007, S. 14, Formel 5.3):

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = M\ddot{q} + vC_1\dot{q} + (gK_0 + v^2K_2)q = f \quad (4)$$

mit den zeitlich veränderlichen Größen: $q = (\phi, \delta)^T$ und $f = (T_\phi, T_\delta)^T$

Gegenmoment Lenker / Force Feedback T_f (Schwab & Recuero, 2013, S. 105, Formel 6) basierend auf Matrizenform der Grundgleichung (Schwab & Recuero, 2013, S. 104, Formel 3):

$$\begin{bmatrix} M_{\phi\phi} & M_{\phi\delta} \\ M_{\delta\phi} & M_{\delta\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{\phi\phi} & M_{\phi\delta} \\ M_{\delta\phi} & M_{\delta\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{\phi\phi} & M_{\phi\delta} \\ M_{\delta\phi} & M_{\delta\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ T_\delta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T_f = -(M_{\delta\phi}\ddot{\phi} + C_{\delta\phi}\dot{\phi} + C_{\delta\delta}\dot{\delta} + K_{\delta\phi}\phi + K_{\delta\delta}\delta) \quad (6)$$

Lehngleichung (Meijaard et al., 2007, S. 23, 24 und 25, Formel B1, B6 und B7):

$$\begin{aligned} -m_T\ddot{y}_P z_T + I_{T_{xx}}\ddot{\phi} + I_{T_{xz}}\ddot{\psi} + I_{A_{\lambda x}}\ddot{\delta} + \psi v S_T + \delta v S_F \cos\lambda \\ = T_{B\phi} - g m_T z_T \phi + g S_A \delta \end{aligned} \quad (7)$$

$$\dot{\psi} = \left(\frac{v\delta + c\dot{\delta}}{w} \right) \cos\lambda \rightarrow \ddot{\psi} = \left(\frac{v\dot{\delta} + c\ddot{\delta}}{w} \right) \cos\lambda \quad (8)$$

$$\ddot{y}_P = \left(\frac{v^2\delta + vc\dot{\delta}}{w} \right) \cos\lambda \quad (9)$$

3 Weiterentwicklung der Querdynamik des BikeSim

Die Querdynamik eines Fahrrads wurde in den vorherigen Kapiteln ausführlich behandelt. Dieser Aspekt zur Erhaltung der Stabilität beim Fahrradfahren ist besonders anspruchsvoll und muss beim Aufbau bzw. der Verbesserung eines Fahrradsimulators mit großer Sorgfalt berücksichtigt werden.

Zur Weiterentwicklung des derzeitigen Setups des BikeSim werden in diesem Kapitel Fahrradsimulatoren anderer Forschungseinrichtungen betrachtet, ehe die derzeitige Umsetzung am DLR Standort Braunschweig analysiert wird. In weiteren Unterkapiteln werden die einzelnen Aspekte der Querdynamik, das Lenken und Lehnen, aufgegriffen und neue Konzepte für die Umsetzung beschrieben und evaluiert. Der Abschluss bildet die Implementierung in den Fahrradsimulator und dessen Softwareanwendung.

3.1 Arbeiten anderer Forschungseinrichtungen

In den letzten Jahren haben mehrere Institutionen und Forschungseinrichtungen häufiger Fahrsimulatoren entwickelt und Studien durchgeführt, allerdings ist die Anzahl von Fahrradsimulatoren im Vergleich zu anderen Fahrsimulatoren wie bspw. Autosimulatoren geringer (Ansariyar et al., 2022, S. 5 und 6). Derzeit werden jedoch vermehrt Fahrradsimulatoren fokussiert und Studien an diesen durchgeführt, um verschiedene Aufgabenbereiche abdecken zu können, wie bspw. die Erforschung des Verhaltens von Fahrradfahrern, um deren Sicherheit zu erhöhen, oder für die medizinische Rehabilitation nach einem Verkehrsunfall (Sun & Qing, 2018, S. 2). Generell können zwei Bauweisen von Simulatoren unterschieden werden: stationäre und bewegungsbasierte bzw. dynamische Simulatoren (Shoman & Imine, 2020, S. 2). Stationäre Simulatoren produzieren nur ein visuelles Feedback für den Nutzer, wohingegen bewegungsbasierte

bzw. dynamische Simulatoren ergänzend zu den visuellen Informationen reale Bewegungen liefern, welche den Realismus des Setups verbessern können und so eine erhöhte Akzeptanz bei den Anwendern erzielt.

Zusätzlich kann man diese Simulatorbauweisen in vier verschiedene Anwendungskategorien von Fahrradsimulatoren einteilen:

- 1.) Anwendung eines Fahrradsimulators zur Modellbildung (dynamische Modelle oder mathematische Gleichungen) der Fahrradstabilität ohne Einbindung von VR (Ansariyar et al., 2022, S. 8).
- 2.) Verknüpfung des modellbasierten Fahrradsimulators mit VR Technologie (Ansariyar et al., 2022, S. 9).
- 3.) Anwendung der Fahrradsimulatoren in Studien zur Förderung der Sicherheit (Ansariyar et al., 2022, S. 10) und
- 4.) Spezielle Anwendungen von Fahrradsimulatoren (Ansariyar et al., 2022, S. 12).

Eine detaillierte Auflistung und Einteilung der verschiedenen Fahrradsimulatoren und deren Studienmerkmale wurde von Ansariyar et al. durchgeführt und wird an dieser Stelle referenziert (Ansariyar et al., 2022, S. 19 bis 29).

3.2 Aktuelle Umsetzung im BikeSim

Der Fahrradsimulator des DLR Institut TS-VUV in Braunschweig ist ein dynamischer Fahrsimulator, der im Labor Multi-User-Simulation zur Erprobung kooperativer Fahrerassistenz (Modular and Scalable Application platform for ITS Components) (MoSAIC) zu finden ist (MoSAIC, o. J.). Zudem sind dort weitere Fahrsimulatoren für PKWs, sog. Sitzkisten, als auch Fußgängersimulatoren aufzufinden, um Interaktionen und die (non-verbale) Kommunikation zwischen mehreren Verkehrsteilnehmern zu ermöglichen und hierdurch das Verhalten der verschiedenen Verkehrsteilnehmer zu analysieren.

Der derzeitige Aufbau des BikeSim ist der Abbildung 13 zu entnehmen, auf welchen im Weiteren eingegangen wird.



Abbildung 13: Aufbau des BikeSim

Der Mittelpunkt des Simulators beinhaltet ein modifiziertes Fahrrad, welches auf einer Bewegungsplattform mittels einer Aluminiumkonstruktion festmontiert ist. Die Gabel sowie die Räder wurden zur Einbindung verschiedener Force Feedback Komponenten demontiert, die in den folgenden Abschnitten erklärt werden. Die Datenblätter der verwendeten Bauteile für den Bereich der Querdynamik befinden sich im Anhang A.

Die Krafrückkopplung für das Lenkverhalten wird durch einen Servomotor realisiert (*BSH1003P31A2A - Servomotor, Lexium BSH, 100mm, 8,0Nm, Passfeder IP65, Singelturm 128P/U, 2xM23 abgewinkelt | Schneider Electric Deutschland, o. J.*), welcher in Verbindung mit einem hinterlegten Dynamikmodell ein lenkwinkelabhängiges Widerstandsmoment bereitstellt. Dieses dynamische System basiert auf der Berechnung des Lenkwiderstandsmoments eines PKW-Lenkrads.

Die Generierung der quer- und längs gerichteten Bewegung wird durch eine Bewegungsplattform mit zwei Freiheitsgraden realisiert (SIMUMAK, 2020), welche die Nick- und Rollbewegung nachbildet, um eine Straßenneigung und das Lehnen während der Fahrt zu simulieren. Die Plattform kann bis zu $\pm 12^\circ$ Steigung als auch $\pm 30^\circ$ Lehnen realisieren (Abbildung 14) (SIMUMAK, 2020, S. 5), sicherheitsbedingt ist das Lehnen jedoch auf $\pm 15^\circ$ begrenzt. Die Regelung erfolgt entweder kraftgesteuert (durch eine extern aufgebrachte Kraft bzw. Drehmoment) oder positionsgesteuert (durch Eingabegrößen innerhalb des Programmcodes), eine Kombination beider Varianten ist nicht möglich. Derzeit ist eine kraftgesteuerte Regelung aktiv geschaltet, sodass der Nutzer den Fahrradsimulator lehnen kann. Allerdings birgt die Kraftsteuerung die Gefahr, dass es zu einem „Aufschaukeln“ beim Lehnen kommen und somit eine Gefährdung des Probanden hervorrufen kann.

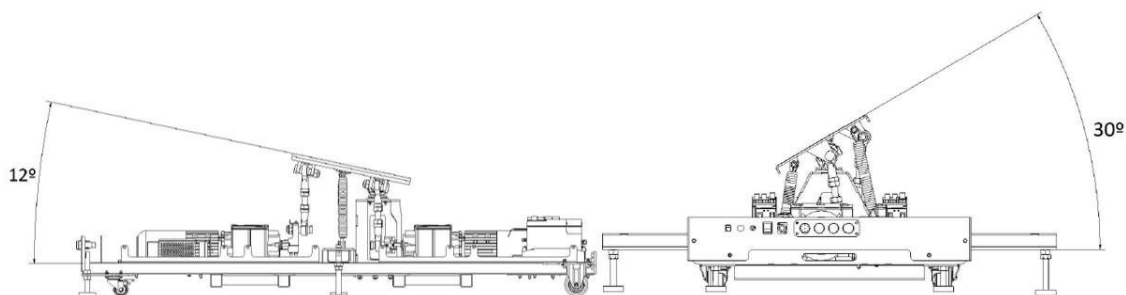


Abbildung 14: Zwei DOF-Bewegungsplattform

Zur Erzeugung des Tretwiderstands wird ein Fahrrad-Heimtrainer verwendet, welcher durch ein vormontiertes Zahnradpaket mit dem Kettenantrieb des Fahrrads verbunden ist (Garmin & subsidiaries, o. J.). Dadurch kann die Pedalkraft auf den Heimtrainer übertragen und auf dessen sich im Inneren befindlichen Schwungrads übermittelt werden. In Verbindung mit einer Wirbelstrombremse (in Form von jeweils acht Permanent- und Elektromagneten) wird ein einstellbares Widerstandsmoment am „Hinterrad“ simuliert. Über die drahtlosen Kommunikationsschnittstellen des Heimtrainers (u.a. Bluetooth Low Energy (BLE)) können Daten wie Geschwindigkeit, Trittfrequenz und Leistung abgerufen und in die Simulations-umgebung übertragen werden.

Um die Bremskraft zu bilden, sind zwei S-förmige Zugkraft-Wägezellen in das ursprüngliche Bremssystem implementiert, wodurch ein ähnliches Bremsgefühl wie bei einer realen Fahrradfahrt zu erwarten ist. Um das Schwungrad ebenfalls abzubremsen, ist einer der vorhandenen Bremshebel zusätzlich mit einer modifizierten Felgenbremse verbunden, dessen Bremssattel an der außenliegenden Oberfläche des Schwungrads eine Anpresskraft erzeugt und es hierdurch stoppt. Um auf eine geeignete Höhe zu gelangen, ist eine weitere Aluminiumkonstruktion auf der Bewegungsplattform montiert worden, mit welcher die modifizierte Bremsanlage verschraubt ist (Abbildung 15).



Abbildung 15: Aufbau der Bremse des BikeSim

Eine weitere Force Feedback Komponente bildet ein Fahrtwind-Simulator in Form eines Bodenventilators (nicht in Abbildung 13 dargestellt), welcher den Komfort während der Fahrt erhöht und somit die Simulatorkrankheit reduzieren kann. Die Stärke des Fahrtwinds ist durch vier manuell auswählbare Stufen einstellbar.

Die Visualisierung der Simulation wird mittels einer Front-Projektion auf einem Monitor oder durch die Verwendung eines HMD in Form einer VR-Brille realisiert. Durch sog. Lighthouses, die sich um den Simulator herum befinden, kann die VR-Brille im Raum erfasst und so eine von der Fahrtrichtung unabhängige Sicht ermöglichen. Zusätzlich werden in diesem Setup VR-Handschuhe eingesetzt, welche zur Erfassung der Handbewegungen dienen und ebenfalls in der Simulation ersichtlich sind.

3.3 Konzeptionierung eines verbesserten Lenkers und Lenkverhaltens

Die jetzige Berechnung des Lenkwiderstandsmoments basiert auf einem lenkwinkelabhängigen, dynamischen System eines PKW-Lenkrads. Dieses soll durch ein messwertbasierendes Modell oder ein dynamisches Fahrradmodell ersetzt werden, um ein realistisches Gefühl bei der Benutzung des Simulators zu verwirklichen. Die Umsetzung der gewählten Konzeptionierung soll durch ein zu entwickelndes C++-Programm erfolgen, welches in der DLR-internen Softwareapplikation Dominion inkludiert werden kann.

3.3.1 Variante 1: Nutzung von auf Messwerten basierenden Interpolationen

Bei der Entwicklung des verbesserten Lenkverhaltens wurde zunächst die Erstellung von Lookup Tables (LUTs), auch Umsetzungs-, Zuordnungs- oder Wertetabellen genannt, fokussiert (Lipinski, 2014). LUTs beinhalten vorberechnete bzw. interpolierte Werte aus nichtlinearen oder komplexen Funktionen, um einen hohen Rechenaufwand während des Programmabrufs zur Wertermittlung zu vermeiden. Die eingetragenen Werte basieren auf interpolierten und geglätteten Messwerten des DLR Instituts TS-VUV (García & Gröne, 2022b).

Diese Messwerte wurden in einer experimentellen Erprobung an einem modifizierten Fahrrad mit zusätzlichen Sensoren zur Bestimmung der aufgebrachten Lenkkraft und des auftretenden Lenkwinkels bei variierender Fahrgeschwindigkeit ermittelt (García et al., 2022, S. 3). Die Lenkkraft wurde durch eine Kraftsensorik, welcher auf dem eigentlichen Lenker mittels einer Aluminiumkonstruktion montiert ist, gemessen. Der Lenkwinkel konnte durch die Stellung / Position eines Potentiometers und dem daraus resultierenden Widerstandswert festgehalten werden.

Die beiden Messvorrichtungen sind in Abbildung 16 (García et al., 2022, S. 3) dargestellt.

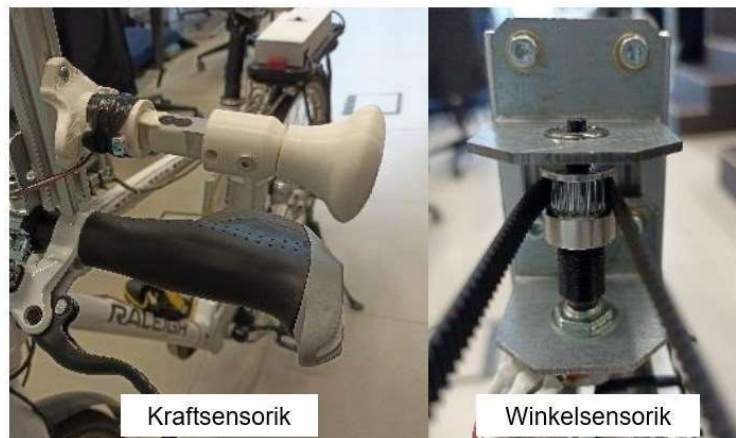


Abbildung 16: Messvorrichtungen am modifizierten Fahrrad

Um Rückschlüsse bei den Messungen zu erhalten, wurden identische Fahrmanöver bzw. Abfolgen bei den Messfahrten mit den Geschwindigkeiten 0 km/h, 10 km/h, 15 km/h und größer 15 km/h durchgeführt. Die Fahrmanöver bzw. Abfolgen sahen vor, dass der Lenker zunächst nach rechts, im Anschluss mittig, dann nach links, wieder mittig, nach links, erneut zur Mitte, dann wieder rechts und schließlich mittig ausgerichtet werden soll, sodass die Reihenfolge R, M, L, M, L, M, R, M entsteht. Dadurch sollte eine Vergleichbarkeit unter den einzelnen Messfahrten erzielt werden. Die Messwerte inkludierten die Position des Potentiometers „Pos“, den Zeitstempel „Timestamp“ und die aufgebrachte Last in Gramm „LoadG“. In Abbildung 17 ist ein Ausschnitt der ermittelten Messwerte ersichtlich (García & Gröne, 2022b).

| Timestamp | LoadG | Pos |
|-----------|-------|-----|
| 4520 | -2.09 | 564 |
| 4542 | -2.09 | 564 |
| 4563 | 3.29 | 564 |
| 4584 | 3.29 | 563 |
| 4605 | 3.29 | 541 |
| 4626 | 3.29 | 559 |
| 4652 | 3.29 | 563 |
| 4674 | 15.09 | 563 |
| 4695 | 15.09 | 563 |
| 4716 | 15.09 | 563 |
| 4737 | 15.09 | 563 |

Abbildung 17: Ausschnitt der Messergebnisse

Um die Messwerte für den Simulator zu nutzen, wurde zunächst die Nutzbarkeit dieser Werte mit den folgenden Formeln und Schritten sichergestellt:

1.) Umwandlung der Potentiometer-Position „Pos“ X zur Lenkerstellung bzw. zum Lenkwinkel δ durch Interpolation mit zwei Punkten:

$$\delta = ((MaxY - MinY) / MaxX - MinX) * (X - MinX)) + MinY \quad (10)$$

mit: $MinX = 170; MaxX = 1000; MinY = -60; MaxY = 45$

2.) Umrechnung des Lenkwinkels δ von $^\circ$ in rad:

$$\delta = \frac{\delta \cdot \pi}{180} [rad] \quad (11)$$

3.) Umrechnung des Zeitstempels „Timestamp“ in Δt :

$$\Delta t = \frac{(jetziger\ Timestamp - vorherigem\ Timestamp)}{1000} [s] \quad (12)$$

4.) Umrechnung der Last „LoadG“ in Drehmoment T :

$$T = \frac{LoadG \cdot g \cdot l}{2 \cdot 1000} = \frac{LoadG \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,10m}{2 \cdot 1000} [Nm] \quad (13)$$

5.) Berechnung der Lenkwinkelgeschwindigkeit $\dot{\delta}$ und -beschleunigung $\ddot{\delta}$:

$$\dot{\delta} = \frac{\Delta\delta}{\Delta t} \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (14)$$

$$\ddot{\delta} = \frac{\Delta\dot{\delta}}{\Delta t} \left[\frac{rad}{s^2} \right] \quad (15)$$

6.) Glättung der Lenkwinkelgeschwindigkeit $\dot{\delta}$ und Lenkwinkelbeschleunigung $\ddot{\delta}$ mit einem Mittelwertfilter mit 20 Werten

Nachdem diese Messwerte entsprechend der oben genannten Durchführung umgerechnet wurden, konnten im weiteren Verlauf die Zustandsdiagramme erstellt werden. Mit Hilfe der erstellten Diagramme sollen Linearitäten und / oder markante Punkte für die Erstellung der LUTs ermittelt werden. Insgesamt soll es drei LUTs geben, wobei für die absolute Fahrgeschwindigkeit des Fahrrads, die Winkelgeschwindigkeit des Lenkers und des Lenkwinkels jeweils eine Drehmoment-LUT erstellt wird. Die Summe der drei LUTs bildet das Gegenmoment, das sog. Force Feedback oder Haptic Feedback T_f (Abbildung 18) (García et al., 2022, S. 7).

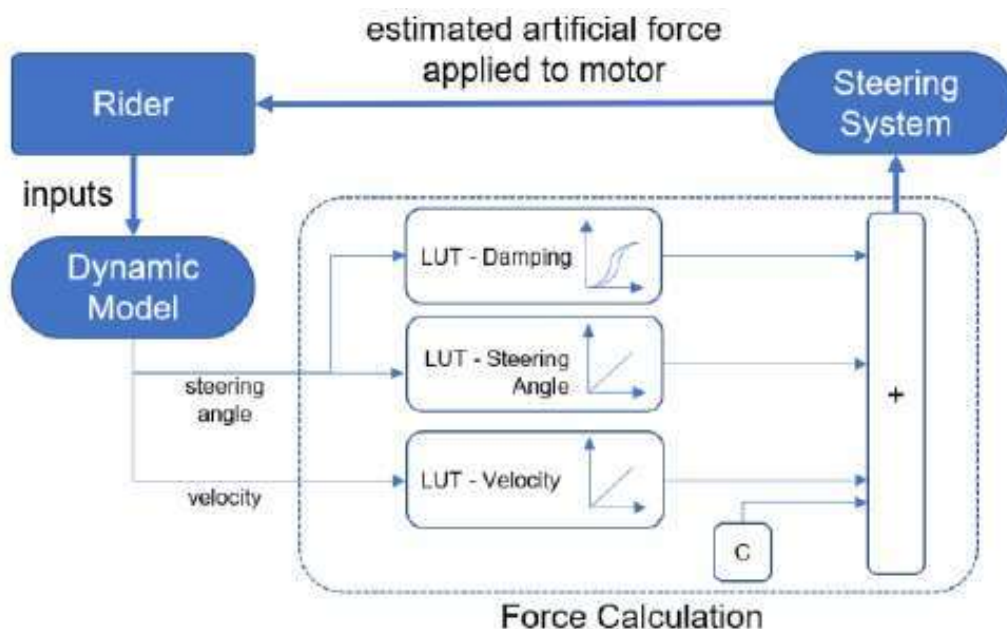


Abbildung 18: Schematische Berechnung des Force Feedbacks T_f

Nach mehreren Besprechungen und Umrechnungen wurde dieser Ansatz jedoch verworfen, da eine mangelnde Wiederholgenauigkeit sowie auftretende Messfehler in den Messungen nicht ausgeschlossen werden können, bspw. durch eine Nichtbetätigung der Kraftsensorik oder ein Lösen der Stromversorgung am Potentiometer. Diese Ungenauigkeiten wurden durch den Vergleich mit weiteren Arbeiten anderer Forschungsinstitutionen bestätigt (Studien von u.a. Meijaard et al. und Schwab und Recuero), welche mehrere Messungen für die Erstellung und Erprobung ihrer Fahrradsimulatoren durchführten (Meijaard et al., 2007; Schwab & Recuero, 2013).

3.3.2 Variante 2: Mathematischer Ansatz basierend auf Dynamikmodell

Im weiteren Verlauf wird das mathematische Modell von Schwab und Recuero, basierend auf den Erkenntnissen von Meijaard et al. (Meijaard et al., 2007, S. 1 bis 63), betrachtet, um das Force Feedback T_f für den Lenker berechnen zu können (Schwab & Recuero, 2013, S. 105). Hierbei müssen die einzelnen Aspekte des Fahrrads betrachtet werden. Die Ausgangsformel für das Gegenmoment ist hierbei die Standardformel zur Betrachtung des Fahrrads (Meijaard et al., 2007, S. 14, Formel 5.3):

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = M\ddot{q} + vC_1\dot{q} + (gK_0 + v^2K_2)q = f \quad (16)$$

mit den zeitlich veränderlichen Größen: $q = (\phi, \delta)^T$ und $f = (T_\phi, T_\delta)^T$

Aus dieser Grundgleichung und dessen Matrizenform kann das Gegenmoment des Lenkers bzw. das Force Feedback T_f berechnet werden (Schwab & Recuero, 2013, S. 105, Formel 6):

$$T_f = -(M_{\delta\phi}\ddot{\phi} + C_{\delta\phi}\dot{\phi} + C_{\delta\delta}\dot{\delta} + K_{\delta\phi}\phi + K_{\delta\delta}\delta) \quad (17)$$

Für die einzelnen Matrizenwerte, wie bspw. dem zweiten Massenmatrizenwert $M_{\delta\phi}$ wurden die Berechnungen mit den gegebenen Fahrradwerten entsprechend Meijaard et al., 2007, nachvollzogen (Meijaard et al., 2007, S. 9 und 21 bis 27) und mit den ermittelten Werten für das Gegenmoment bzw. Force Feedback T_f nach Schwab und Recuero, 2013, verglichen (Schwab & Recuero, 2013, S. 108). Bei dieser Prüfung wurden die ermittelten Werte erfolgreich verifiziert, sodass einer Implementierung des dynamischen Modells nichts im Wege steht.

Hierfür wurde ein C++-Programm vorbereitet, welches zum einen die Berechnung der Matrizen in einem Objekt inkludiert, zum anderen die Bereitstellung des Force Feedbacks T_f im Hauptprogramm beinhaltet. Durch die Aufspaltung

beider Rechnungen kann eine Abstimmung der Parameter zur Erprobung verschiedener Konfigurationen vorgenommen werden, ohne die eigentliche Berechnung erneut anzupassen. Zusätzlich ist ein weiterer Faktor für eine Feinabstimmung des Gegenmoments inkludiert worden, welcher als Ausgleich für die Abstimmung zwischen Servomotor und dem verwendeten Gleichrichter dient. Der Programmablaufplan (PAP) für die Berechnung des Force Feedbacks T_f und die Übertragung auf den Fahrradsimulator ist der Abbildung 19 zu entnehmen.

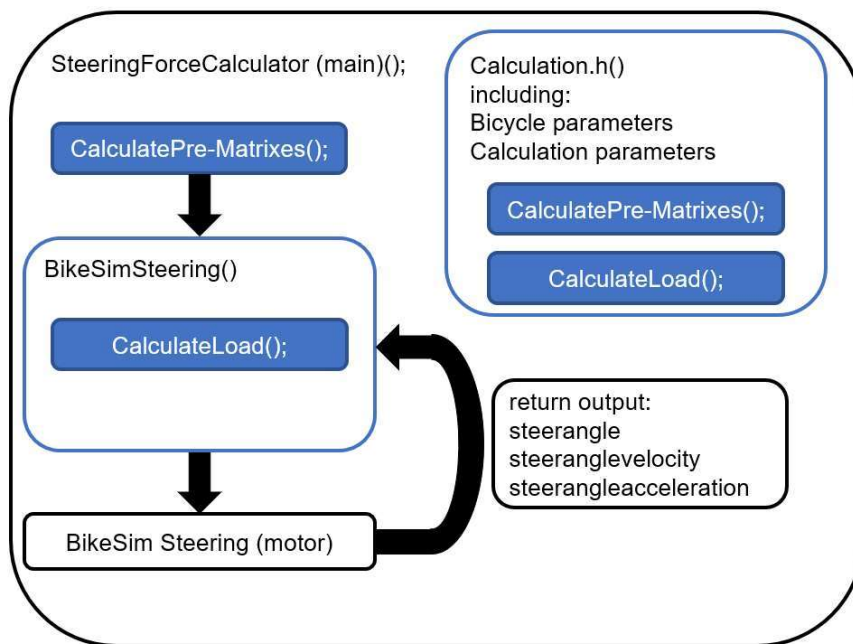


Abbildung 19: PAP des Lenkverhaltens

3.4 Konzeptionierung eines verbesserten Lehns und Lehnverhaltens

Nachdem für das Force Feedback T_f der mathematische bzw. dynamische Ansatz ein besseres und wiederholgenaues Verhalten aufzeigte, wird für das Lehnen des Fahrradsimulators ebenfalls dieser Ansatz für die Umsetzung verfolgt. In diesem Zuge soll ein weiteres C++-Programm erstellt werden, welches ebenfalls in der DLR-internen Softwareapplikation Dominion einge-

spielt wird und hierdurch einen Wechsel der Ansteuerung der zwei DOF-Bewegungsplattform ermöglicht. Derzeit erfolgt die Änderung der Plattform durch einen Kraft- / Drehmomentauftrag des Fahrradfahrers (Kraftsteuerung), welche allerdings nicht definiert eingestellt werden kann. Zudem drückt die Bewegungsplattform den Fahrer mit einer zu hohen Federkraft in die Mitte zurück, was beim Mitwirken des Fahrers zu einer Pendelbewegung und einem Sicherheitsrisiko führen kann. Daher ist die Ansteuerung der Weiterentwicklung als Positionsteuerung auszulegen, um für die notwendige Sicherheit und einem Entgegenwirken des Aufschwingens zu sorgen.

Für die dynamische Modellierung werden die Formeln aus dem Kapitel 2.5 aufgegriffen und entsprechend analysiert.

Die Formeln des Lehnverhalten lauten wie folgt (Meijaard et al., 2007, S. 23, 24 und 25, Formel B1, B6 und B7):

$$\begin{aligned}
 -m_T \ddot{y}_P z_T + I_{T_{xx}} \ddot{\phi} + I_{T_{xz}} \ddot{\psi} + I_{A_{\lambda x}} \ddot{\delta} + \dot{\psi} v S_T + \delta v S_F \cos \lambda \\
 = T_{B_\phi} - g m_T z_T \phi + g S_A \delta
 \end{aligned} \tag{18}$$

$$\dot{\psi} = \left(\frac{v \delta + c \dot{\delta}}{w} \right) \cos \lambda \rightarrow \ddot{\psi} = \left(\frac{v \dot{\delta} + c \ddot{\delta}}{w} \right) \cos \lambda \tag{19}$$

$$\ddot{y}_P = \left(\frac{v^2 \delta + v c \dot{\delta}}{w} \right) \cos \lambda \tag{20}$$

In Formel 3.4.1 ist erkennbar, dass ein aufgebrachtes Lehnmoment des Fahrers T_{B_ϕ} ermittelt werden muss, um die Gleichung final nach dem Lehnwinkel ϕ auflösen zu können. Jedoch hat die eingesetzte zwei DOF-Bewegungsplattform keine Sensorik zur Messung der aufgebrachten Kräfte / Drehmomente des Fahrers inkludiert, welche eine Rückkopplung für die Berechnungsgrundlage ermöglichen würde.

In Anlehnung an die oben genannten Formeln wird daher ein anderer Ansatz entwickelt, der die Ansteuerung der Plattform gewährleistet. Die Berechnung wird in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und des Lenkwinkels erstellt ähnlich

der Formel 3.4.3) für die Auslenkungsbeschleunigung am hinteren Kontaktpunkt P \ddot{y}_P .

Die Abbildung 20 verdeutlicht die Entwicklung des Konzepts (in Anlehnung an Åström et al., 2005, S. 28; Meijaard et al., 2007, S. 2).

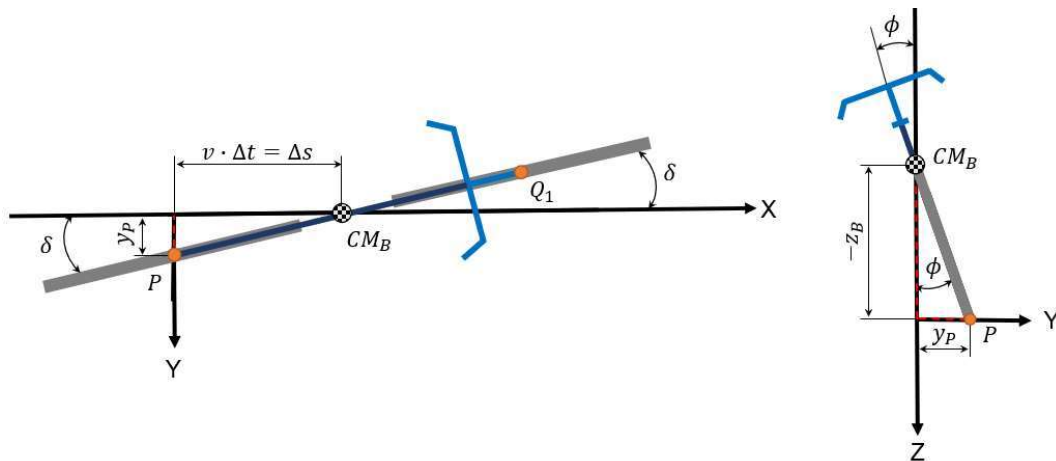


Abbildung 20: Konzept für Lehnen und Lehnverhalten

Für die Berechnung des Lehnwinkels ϕ wird zunächst die Verschiebung des hinteren Kontaktpunktes P y_P wie folgt ermittelt:

$$\sin\delta = \frac{y_P}{\Delta s} = \frac{y_P}{v \cdot \Delta t} \rightarrow y_P = \sin\delta \cdot v \cdot \Delta t \quad (21)$$

Im nächsten Schritt ist auf dieser Grundlage der Lehnwinkel ϕ final bestimmbar:

$$\tan\phi = \frac{y_P}{-z_B} \rightarrow \phi = \arctan\left(\frac{y_P}{-z_B}\right) \quad (22)$$

Um eine Kompensierung der Verschiebung y_P zu ermöglichen, wird ein „Bleeding“-Faktor bei der Berechnung gesetzt, welcher ein Auftauchen von Fehlern bei der Integral- und Differentialrechnung zurücksetzt und somit die Plattform weicher (ohne einen plötzlichen „Sprung“ in der Ansteuerung) verfahren lässt. Des Weiteren wurden die Eingaben des Lenkwinkels δ und der gemessenen Fahrgeschwindigkeit v parametrisiert, um eine spätere Anpassung für ein noch feineres bzw. weiches Lehnverhalten zu ermöglichen. Ebenfalls wurde ein Bereich für den Lenkwinkel δ durch eine Erprobung festgelegt, um die Plattform

nicht bei den kleinsten Winkeländerungen zu verfahren. Dies gilt ebenfalls für die Fahrgeschwindigkeit v . Die Grenzen hierfür liegen bei $\pm 0,05$ rad bzw. ca. $\pm 3^\circ$ und ab 2,5 m/s. Zusätzlich wurde der maximale Lehnwinkel ϕ auf $\pm 15^\circ$ begrenzt und die Verfahrgeschwindigkeit der Plattform reduziert, um eine Pendelbewegung wie im vorherigen Setup zu verhindern.

Das zuvor beschriebene Berechnungskonzept ist in der Unreal Engine Umgebung erfolgreich getestet worden, ehe die finale Version mit Faktoren und Parametern in ein C++-Programm für die Implementierung in Dominion durchgeführt wurde. Der PAP für die Ansteuerung der Plattform und die Übertragung auf den BikeSim ist in Abbildung 21 dargestellt. Wichtig hierbei ist, dass auf dieselbe Headerdatei zur Berechnung der Vormatrizen, die beim Lenkverhalten Anwendung findet, zugegriffen wird.

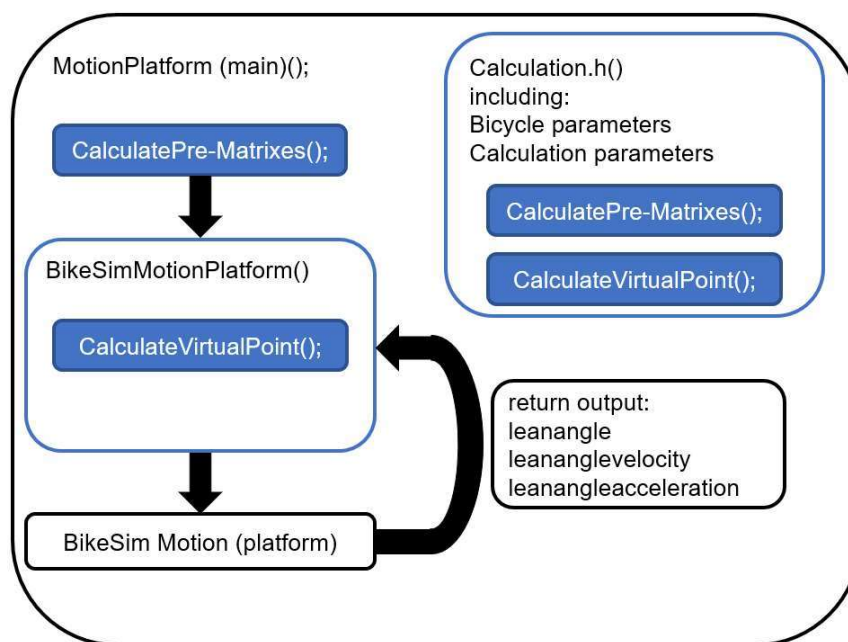


Abbildung 21: PAP des Lehnverhaltens

3.5 Implementierung der Veränderungen

Nach der Erstellung der beiden Querdynamik-Programme für das Lenken und das Lehnen findet die Implementierung in die DLR-interne Softwareapplikation Dominion statt. Die vorbereiteten C++-Programme sind so aufzubereiten und an die entsprechenden Positionen zu setzen, dass eine reibungslose Übergabe an den Stellen der derzeitigen Programmknotenpunkte, insbesondere die Parametrisierung der Positionssteuerung der Bewegungsplattform, stattfindet. Anderenfalls besteht die Möglichkeit einer falschen Berechnung für das Gegenmoment des Lenkers T_f oder der inkorrekten Ansteuerung der Bewegungsplattform. Die Einbindung der Programmabschnitte ist in Zusammenarbeit mit dem DLR geschehen und im Anschluss erfolgreich in diversen Testdurchläufen überprüft worden. Die Programmausschnitte der Querdynamik-aspekte sind im Anhang B zu finden.

Die auftretenden Parameter wie Widerstands- bzw. Gegenmoment des Lenkers T_f sowie Lenkwinkel δ und Lehnwinkel ϕ und deren Ableitungen weisen eine Veränderung zur Vorgängerversion auf, wodurch die Möglichkeit der Änderung der Querdynamik als bestätigt angenommen wird. Die Überprüfung beider Versionen wird im Weiteren durch eine Probandenstudie geprüft, um die Änderungen durch objektive und subjektive Kriterien als Verbesserung validieren zu können.

4 Evaluierung & Validierung der Querdynamik

Bevor der Fahrradsimulator für die eigentliche Verkehrssicherheitsforschung nutzbar ist, muss die Validität des Simulators als Forschungsinstrument festgestellt und hinsichtlich der verschiedenen Versionen (im Folgenden als Fahrprofile bezeichnet) evaluiert werden. Somit können Vorteile und Grenzen des Simulators ermittelt werden, insbesondere im Hinblick auf subjektive Kriterien wie Akzeptanz, Präsenz (Immersion), Realismus und Simulation Sickness, damit künftige Forschungen im Rahmen der Möglichkeiten des Simulators durchgeführt werden können.

Weitere Motivationen für künftige Forschungen sind u.a. (Jurczok, 2021, S. 7 und 8):

- Wiederanstieg des Fahrradfahrens innerhalb der letzten Jahre
- Kontinuierliche Zunahme von Elektrofahrrädern im Straßenverkehr
- Steigende Spritpreise, wodurch die Nutzung von Fahrrädern im Allgemeinen attraktiver wird
- Anstieg der Verkehrsunfälle mit Fahrradfahrern

Die implementierten Veränderungen hinsichtlich der Querdynamik sollen durch eine Probandenstudie, der BikeEval2, überprüft werden. Zusätzlich wird mit der BikeEval2 eine Bachelorarbeit für die Anpassung der Längsdynamik überprüft. In dieser Studie wird begutachtet, ob die lateralen Änderungen des Simulators Veränderungen bezüglich der subjektiven Maße ‚Akzeptanz‘, ‚Simulator Sickness‘, ‚Realismus‘ und ‚Präsenz‘ als auch des objektiven Kriteriums ‚Fahrverhalten‘ ergeben. Dies soll dabei helfen, den Fahrradsimulator zu verbessern, um zukünftig reale Verkehrssituationen in einem virtuellen Szenario und einer immersiven Umwelt abzubilden. Dazu werden die Probanden zwei Durchgänge in randomisierter Reihenfolge auf dem Fahrradsimulator fahren, wobei das Fahrprofil nach jedem Durchgang wechselt, um eine Vergleichbarkeit zwischen der alten und der neuen Simulatorversion zu erreichen. Die ermittelten Ergebnisse können im Folgenden zur weiteren Verbesserung des Systems

als auch zur Kalibrierung genutzt werden, damit das Fahrverhalten dem eines realen Fahrrads entspricht.

Ziel ist es, 30 komplette Datensätze von volljährigen Personen, unabhängig ihres Geschlechts, die mindestens einmal im Monat Fahrrad fahren, zu generieren und auszuwerten. Die ermittelten Datensätze werden auf einer DLR Intranetseite abgelegt, um spätere Korrelationen zu weiteren Studien ziehen zu können (García & Gröne, 2022). Die markanten Unterschiede zwischen beiden Fahrprofilen sind in Tabelle 1 aufgeführt (García & Gröne, 2022a), wobei die querdynamischen Teilbereiche farblich hervorgehoben sind.

Tabelle 1: Unterschiede der Fahrprofile

| Feature | Fahrprofil Alt | Fahrprofil Neu |
|------------------|--|--|
| Lenkung | Modifizierte Lenkkraftsimulation basierend auf Kraftfahrzeugen (KFZs) | Modellbasierter Ansatz & Berechnung des Lenkwiderstandes durch Physikmodell |
| Lehnen | Kraftregelung der Plattform | Modellbasierter Ansatz & Positionsregelung der Plattform |
| Fahrtwind | Statisch bzw. nicht geschwindigkeitsabhängig | Dynamisch bzw. geschwindigkeitsabhängig |
| Antrieb | Nicht modifizierter Krafttrainer BLE → Niedrige Auflösung, hohe Latenz Scheibenbremse am Schwungrad ¹ | Modifizierter Krafttrainer Drehgeber → Hohe Auflösung, niedrige Latenz Scheibenbremse am Schwungrad ¹ |

In den folgenden Unterkapiteln werden die Hypothesen und Fragestellungen, die Konzeptionierung der Trainings und Szenarien, sowie die Durchführung der Studie und die Auswertung der Ergebnisse betrachtet und erklärt.

¹ Da der mechanische Aufbau der Bremse während des Fahrprofils nicht gewechselt werden kann, wird auch bei dem Fahrprofil Alt die Scheibenbremse in Kombination mit der BLE-Sensorik des Krafttrainers genutzt.

4.1 Hypothesen und Fragestellungen

Die zentrale Fragestellung, ob die Querdynamik entsprechend eines dynamischen Fahrradmodells angenommen werden kann, ist in Kapitel 3 bereits verdeutlicht und dokumentiert worden. Die zusätzlichen Validierungsfragen, ob sich durch die Änderungen der Querdynamik die Einschätzung der Probanden hinsichtlich der Akzeptanz und des Realismus idealerweise positiv verändert, sind durch die Probandenstudie zu beantworten. Durch die Klärung dieser Fragestellungen kann eine Abschätzung und ein Ausblick für weitere Arbeiten und Forschungen gegeben werden.

Als Grundlage für die Beantwortung der oben genannten Fragen dienen die in Tabelle 2 dargestellten Hypothesen, welche auf den genannten subjektiven Kriterien (Kapitel 4) beruhen.

Tabelle 2: Hypothesen zur Untersuchung der Probandenstudie

| Kürzel | Hypothese |
|---------------|---|
| <i>H1</i> | Fahrprofile haben Einfluss auf die Akzeptanz des Simulators. |
| <i>H2</i> | Fahrprofil Neu ruft eine höhere Akzeptanz als Fahrprofil Alt hervor. |
| <i>H3</i> | Fahrprofil Neu stellt einen stärkeren Realitätsbezug als Fahrprofil Alt her. |
| <i>H4</i> | Fahrprofil Neu löst ein stärkeres Präsenzgefühl (Immersionsempfinden) als Fahrprofil Alt aus. |
| <i>H5</i> | Fahrprofil Neu löst einen geringeren Grad an Simulation Sickness als Fahrprofil Alt aus. |
| <i>H6</i> | Die Reihenfolge der Fahrprofile hat einen Einfluss auf die Bewertung. |

4.2 Konzipierung der Trainings und Szenarien

Damit die Probanden sich mit dem Simulator und der Simulation vor dem jeweiligen Durchgang vertraut machen können, werden zwei Trainingsfahrten mit einer Gesamtfahrzeit von ca. 15 Minuten mit der Unreal Engine Software erstellt. Das erste Training soll dazu dienen, den mechanischen Aufbau und die Reaktionen des Simulators kennenzulernen, ehe im zweiten Training der Proband an die Simulation durch Nutzung einer VR-Brille und VR-Handschuhe herangeführt wird.

Beide Trainings sehen jeweils eine Fahrt mit verschiedenen Aufgaben in der Ortschaft Cremlingen vor, um eine entsprechende Eingewöhnungsphase für die VP zu ermöglichen.

Die beiden Trainings sind in Abbildung 22 und Abbildung 23 erkennbar (García & Gröne, 2022c).

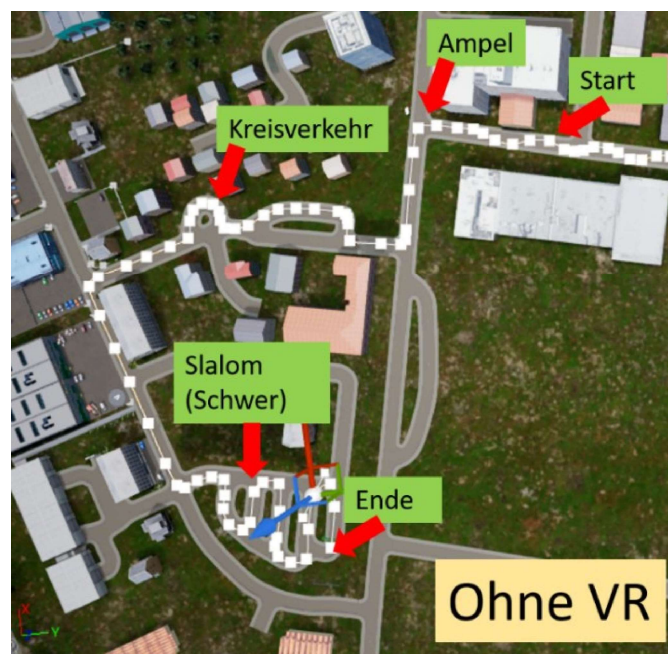


Abbildung 22: Training ohne VR



Abbildung 23: Training mit VR

Für die eigentliche Erprobung des BikeSim werden insgesamt sechs Szenarien ebenfalls mit der Unreal Engine Software erstellt, die den Unterschied zwischen den beiden Fahrprofilen verdeutlichen sollen. Diese Szenarien sollen so konzipiert sein, dass die Lenkung des Fahrradsimulators und die Lehnbewegungen der Plattform überprüft werden können. Die Gesamtfahrzeit der Testfahrten beträgt etwa 30 Minuten.

Die Szenarien wurden wie folgt ausgewählt:

- a) Überquerung der Forschungskreuzung in Braunschweig nach Anhalten an einer Ampel und anschließendem Ausweichen einer Baustelle
- b) Slalomfahrt in Cremlingen, welche durch Baustellenbarken realisiert wird
- c) Zweifaches Linksabbiegen an der Forschungskreuzung in Braunschweig
- d) Interaktion / Ausweichmanöver mit einem Fußgänger, welcher auf dem Fahrradweg an der Forschungskreuzung in Braunschweig zum Stehen kommt
- e) Überholvorgang eines E-Scooter-Fahrers und anschließendem Linksabbiegen an der Forschungskreuzung in Braunschweig
- f) Wendehammer in Cremlingen

Die einzelnen Szenarien sind in Abbildung 24, Abbildung 25 und Abbildung 26 ersichtlich (García & Gröne, 2022c).



Abbildung 24: Szenario a.) (links) und Szenario b.) (rechts)

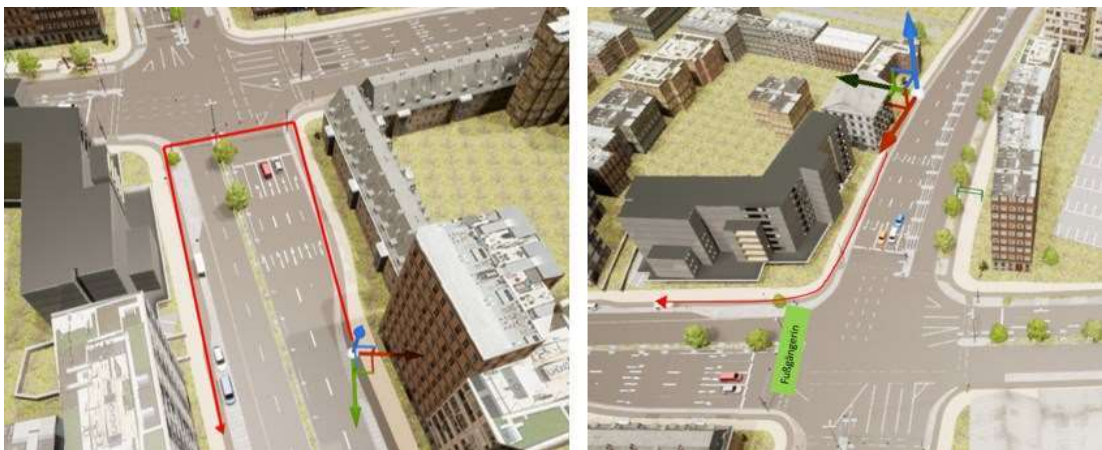


Abbildung 25: Szenario c.) (links) und Szenario d.) (rechts)

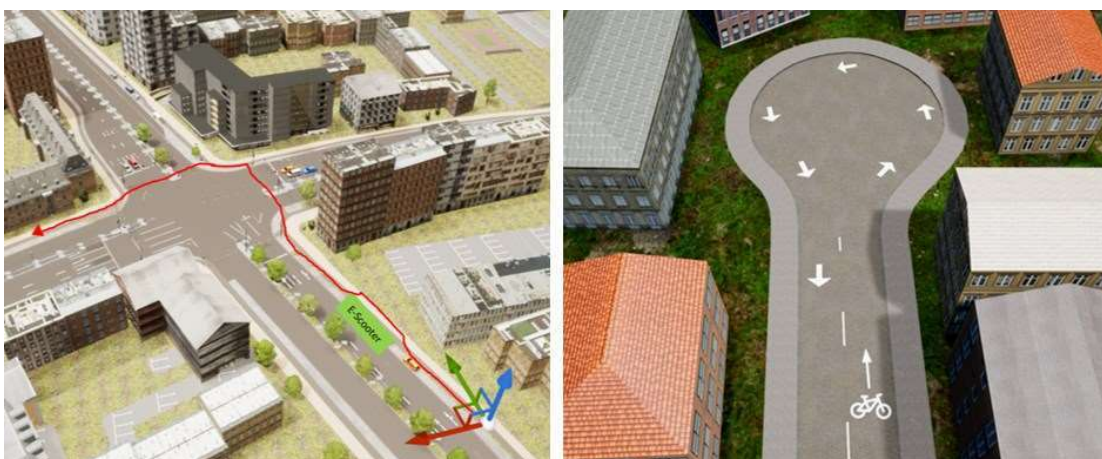


Abbildung 26: Szenario e.) (links) und Szenario f.) (rechts)

4.3 Durchführung der Studie

Nach einer Einleitung zur Studiendurchführung inklusive Unterzeichnung einer Einwilligungserklärung und Beantwortung eines demographischen Fragebogens („Vor dem Versuch“) werden der VP einige Informationen zum Fahrradsimulator von der Versuchsleitung (VL) erklärt und Instruktionen zur Benutzung des Simulators bereitgestellt.

Im Anschluss führt der Proband zunächst ein Training ohne VR mit dem Fahrradsimulator durch, um sich mit der Dynamik des Simulators beim Geradeausfahren, Bremsen, Beschleunigen und Abbiegen vertraut zu machen. Im weiteren Verlauf der Studienteilnahme findet das Training mit VR statt, sodass die VP die Fahrraddynamik in der Simulationsumgebung kennenlernt. Danach erfolgen die Fahrten der im vorherigen Unterkapitel beschriebenen Szenarien und die Durchführung der jeweiligen Aufgabenstellung. Nach jedem Szenario wird das Wohlbefinden des Probanden durch den MISC-Fragebogen („Nach jedem Szenario“) gemessen, welcher in VR auftaucht und verbal beantwortet wird. Die Dokumentation der Antworten wird durch die VL durchgeführt, um eine zwischenzeitliche Unterbrechung der Studie zu vermeiden.

Nach Ausführung aller Aufgaben des ersten Durchgangs wird die VP gebeten, einen Fragebogen („Nach jedem Durchgang“) auszufüllen, welcher SSQ, PQ sowie Fragen zum Realismus und Fahrgefühl inkludiert. Nach der Beantwortung startet der Proband mit dem zweiten Durchgang, wobei hier das andere Fahrprofil aktiv geschaltet ist.

Nach zwei weiteren Trainings ohne und mit VR folgen die weiteren Szenarien / Aufgaben. Ebenfalls wird nach jedem Szenario der MISC-Fragebogen zur Messung des Wohlbefindens gestellt. Nach Abschluss des zweiten Durchgangs wird zusätzlich zum bisherigen Fragebogen ein Abschlussfragebogen („Abschlussfragebogen“) gestellt, um einen Vergleich zwischen beiden Durchgängen zu ziehen.

Die genaue Studiendurchführung ist in Abbildung 27 (García & Gröne, 2022d) erkennbar und die einzelnen Fragebögen sind dem Anhang C zu entnehmen.

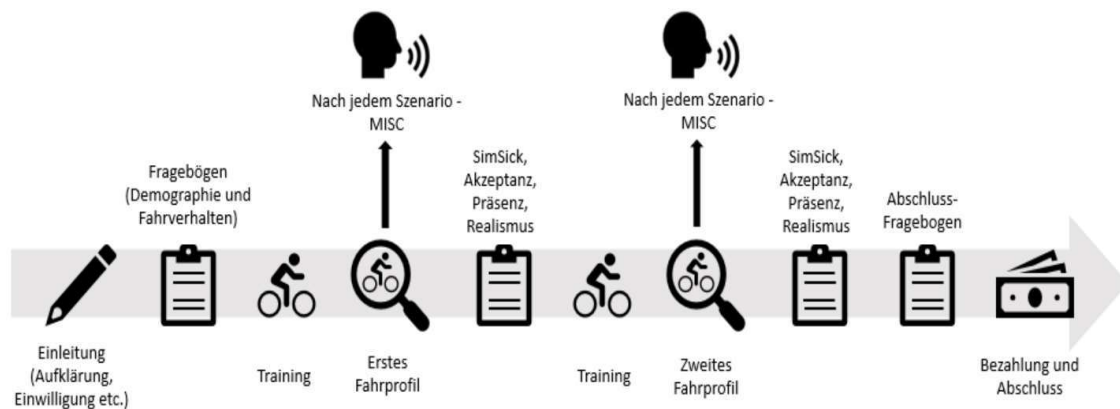


Abbildung 27: Ablauf der Studiendurchführung

Aus den Erkenntnissen soll abgeleitet werden, welches Fahrprofil eine höhere Akzeptanz, ein stärkeres Präsenzgefühl und eine geringere Simulation Sickness hervorruft. Hierdurch können weitere Schlussfolgerungen gezogen werden, um das allgemeine Unwohlsein im Simulator zu reduzieren und einen realistischen Fahrradsimulator zu generieren. Zusätzlich leisten die Bewertungen der VPs einen Beitrag dazu, weitere Simulatorstudien in Zukunft effizienter sowie zielführender gestalten und durchführen zu können.

4.4 Bewertung der Studienergebnisse

An der Studie zur Validierung des BikeSim haben insgesamt 35 VPs teilgenommen, von denen elf Personen weiblich und 24 Personen männlich waren, wovon acht Probanden (sechs Frauen und zwei Männer) die Studie vorzeitig aufgrund von u.a. Simulation Sickness abbrechen mussten. Die Abbruchquote lag somit bei 22,86 %. Die ausgefüllten Fragebögen der betroffenen Personen wurden in der Auswertung zurückgestellt, sodass sich die dargestellten gesamtheitlich betrachteten Ergebnisse und Beantwortung der gestellten Hypothesen und Forschungsfragen aus Kapitel 4.1 auf eine Stichprobengröße von 27 bzw. für die Reihenfolgen von 16 (Alt-Neu) und 11 (Neu-Alt) beziehen.

Die Probanden waren im Durchschnitt 29,37 Jahre alt (Standardabweichung (SD): 7,35 Jahre), fuhren seit 21,81 Jahren Fahrrad (SD: 6,97 Jahre) und hatten eine monatliche Fahrrad-Fahrleistung von 125,30 km.

Wie in Abbildung 28 ersichtlich, hatten 18,52 % bzw. fünf VPs überhaupt keine VR-Erfahrung, wohingegen 29,63 % / acht Probanden mehr als zehn Mal eine VR-Brille nutzten.



Abbildung 28: VR-Erfahrung der erfolgreich teilgenommenen Probanden

Die Abbildung 29 hingegen zeigt die Befragung nach dem Auftreten von Reisekrankheit und der Schwere der auftretenden Symptome. 74,07 % / 20 VPs haben keine Beschwerden und 7,41 % bzw. zwei Probanden gaben an, dass sie unter einer mittelschweren Reisekrankheit leiden. Keiner der erfolgreich teilgenommenen VPs leidet unter schweren Symptomen der Reisekrankheit.



Abbildung 29: Schwere der Reisekrankheit der erfolgreich teilgenommenen Probanden

Für die Bestätigung oder Widerlegung der gestellten Hypothesen und zur Beantwortung der übergreifenden Forschungsfragen wurden die jeweiligen Teilbereiche der Fragebögen (PQ, SSQ, MISC, Akzeptanz, Realismus, Fahrgefühl) analysiert. Das folgende Unterkapitel dient zur Darstellung dieser subjektiven Merkmale und deren Auswertung. Ebenfalls wird die Studie durch die objektiven Kriterien des Fahrverhaltens analysiert, welche im Anschluss an die Darstellung der Ergebnisse der subjektiven Kriterien folgt.

4.4.1 Analyse der subjektiven Kriterien

Zur Übersichtlichkeit werden die einzelnen Hypothesen und die dazugehörige Ergebnisauswertung auf den folgenden Seiten gegenübergestellt, um eine Aussage bezüglich der Änderung der Querdynamik im Hinblick auf die subjektiven Eigenschaften des Simulators treffen zu können. Um signifikante Unterschiede innerhalb Berechnungen darzustellen, müssen die Stichprobengrößen berücksichtigt und ein Konfidenzintervall CI berechnet werden (*t-Test*, *Chi-Quadrat*, *ANOVA*, *Regression*, *Korrelation...*, o. J.). Das Vertrauensniveau wurde auf 90 % gesetzt, um optimistischere Aussagen zu treffen. Für das Konfidenzintervall CI wird zuerst der kritische Wert t_c bei den Freiheitsgraden $\alpha = 0.10$ und $df = n - 1$ für die Stichprobengrößen $n = 27; 16; 11$ berechnet:

$$t_c = z_{1-\alpha/2;n-1} = 1,706; 1,753; 1,812 \quad (23)$$

Das Konfidenzintervall CI lässt sich im Anschluss wie folgt berechnen:

$$CI = \left(\bar{X} - t_c \cdot \frac{SD}{\sqrt{n}}, \bar{X} + t_c \cdot \frac{SD}{\sqrt{n}} \right) \quad (24)$$

Für eine gerichtete bzw. einseitige Signifikanz muss das Signifikanzniveau $p < 0,05$ und für eine ungerichtete bzw. zweiseitige Signifikanz $p < 0,10$ sein. Eine Komplettübersicht der detaillierten Auswertungen und Berechnungen befindet sich im Anhang D.

H1: Fahrprofile haben einen Einfluss auf die Akzeptanz des Simulators.

Um diese Hypothese zu beantworten, ist die Studie mit den zwei Durchgängen (für jedes Fahrprofil ein Durchgang) aufgesetzt worden. Nach jedem Fahrprofil sind die Fragen zur Ermittlung der Akzeptanz nach Van der Laan zu beantworten. Die Skalierung der schematischen Darstellung umfasst den Bereich von +2 bis -2, wobei für eine vereinfachte Darstellung die positiven Eigenschaften (nach entsprechender Umrechnung der invertierten Werte) oberhalb der Mittellinie angetragen sind. Je höher der erreichte Werte, desto größer ist die Zustimmung und folglich schneidet das Akzeptanzattribut besser ab. Die Ergebnisse des jeweiligen Fahrprofils sind in Abbildung 30 dargestellt, wobei die alte Simulatorversion immer zuerst genannt wird und das neue Fahrprofil rechts daneben angeordnet ist.

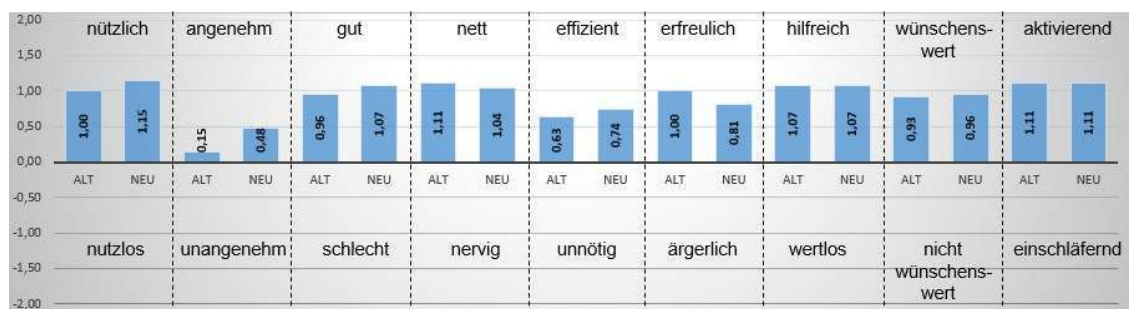


Abbildung 30: H1: Auswertung Akzeptanz

Die Ergebnisse aus der obenstehenden Abbildung präsentieren, dass ein (wenn auch stellenweise nur marginaler) Unterschied in der Akzeptanz der beiden Fahrprofile wahrgenommen wurde. Die größten Differenzen sind in den Teilbereichen nützlich / nutzlos, angenehm / unangenehm und erfreulich / ärgerlich zu erkennen. Hierbei wurde das Attribut angenehm / unangenehm signifikant besser für das neue Fahrprofil (ALT: 0,15 zu NEU: 0,48 mit $p = 0,042$) und der Teilbereich erfreulich / ärgerlich signifikant besser für die vorherige Version (ALT: 1,00 zu NEU: 0,81 mit $p = 0,029$) bewertet. Gesamtheitlich betrachtet ist jedoch eine ähnliche Bewertung beider Fahrprofile zu erkennen. Das neue Fahrprofil schneidet bei fünf von neuen Bereichen besser ab, wohingegen das alte Fahrprofil in zwei von neuen Bereichen einen höheren Wert erzielt. Zusätzlich wurden auf Grundlage der Angaben die Faktoren zur Nützlichkeit und

Zufriedenheit berechnet (Abbildung 31), welche ebenfalls einen Einfluss auf die Akzeptanz aufzeigen.

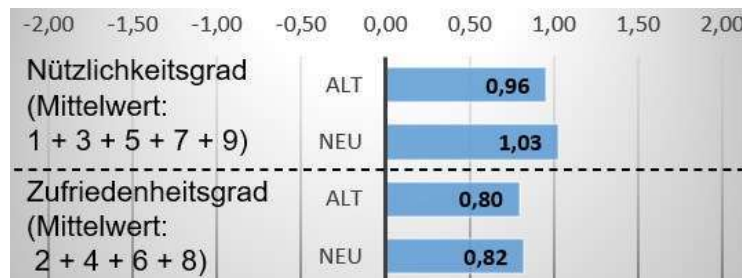


Abbildung 31: H1: Auswertung Nützlichkeits- und Zufriedenheitsgrad

Auch bei diesen beiden Faktoren ist eine ähnliche Bewertung beider Fahrprofile erkennbar. Die größte Differenz liegt hierbei bei dem Nützlichkeitsgrad, welche einen leichten Trend für Fahrprofil Neu aufzeigt, jedoch nicht signifikant ist.

H2: Fahrprofil Neu ruft eine höhere Akzeptanz als Fahrprofil Alt hervor.

Wie in Abbildung 30 und Abbildung 31 erkennbar, empfanden die Probanden das Fahrprofil Neu in Bezug auf die Akzeptanz nicht merklich besser als das Fahrprofil Alt (mit Ausnahme des Teilbereichs angenehm / unangenehm, welcher signifikant gegenüber der vorherigen Simulatorversion gewertet wurde). Durch die ähnliche Bewertung der VPs kann keine klare Aussage in Bezug auf die Gesamtpunktzahl des jeweiligen Fahrprofils geschlossen werden.

H3: Fahrprofil Neu stellt einen stärkeren Realitätsbezug als Fahrprofil Alt her.

Für den Realitätsbezug wurden sowohl die Antworten aus dem Fragebogen nach jedem Fahrprofil als auch aus dem Abschlussfragebogen herangezogen, um das realitätsgetreuere Fahrprofil nach Meinung der VPs zu ermitteln. Abbildung 32 zeigt die Ergebnisse der Antworten nach jedem Fahrprofil, wo bei in der Abbildung jeweils das alte Fahrprofil als Erstes und als Zweites das neue Fahrprofil genannt ist. Die Skala umfasst eine Einteilung von 1 bis 7, wobei 1 eine mangelnde Realitätsgüte aufweist und 7 für ein vollkommen realistisches Empfinden steht.

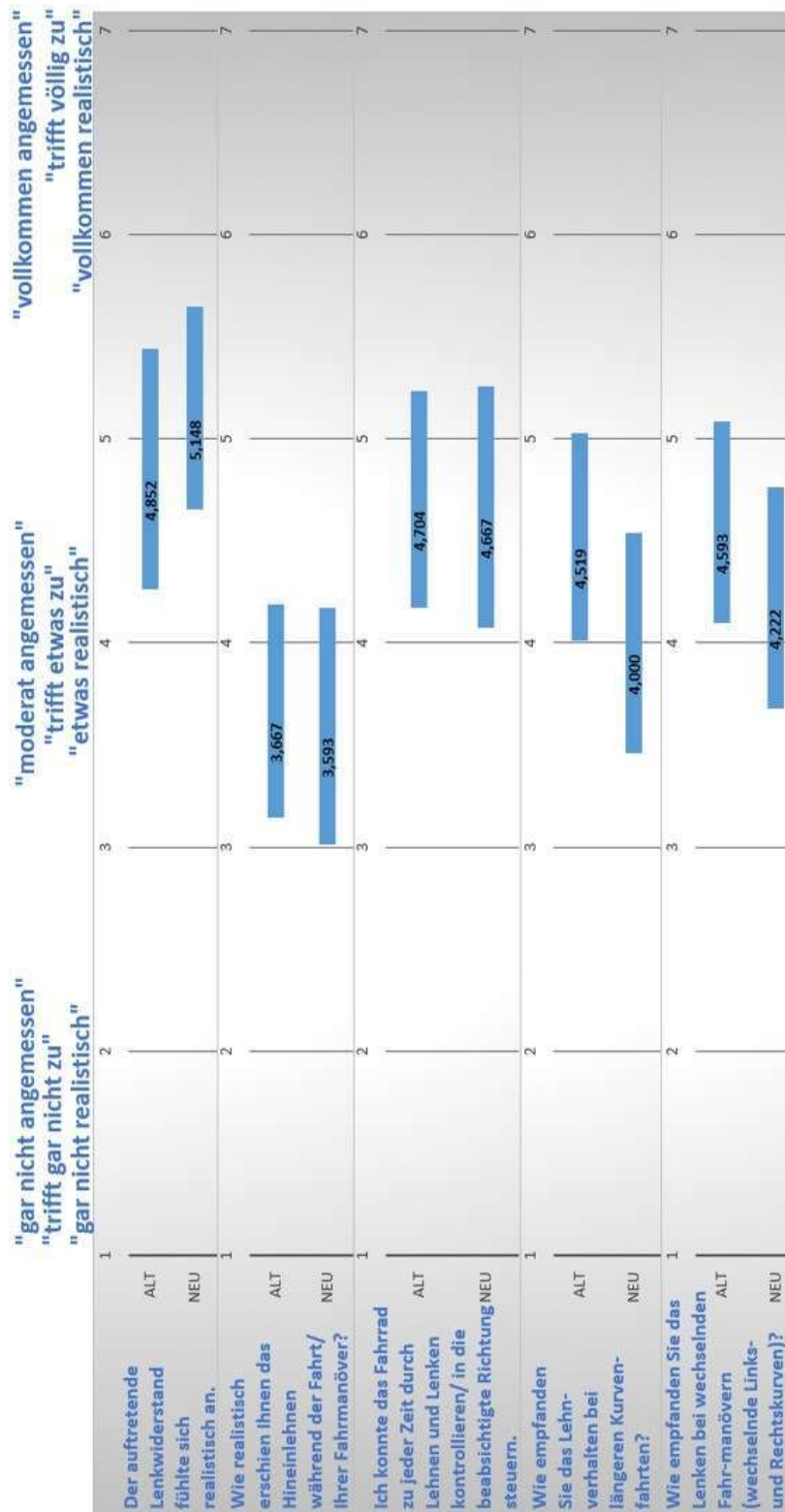


Abbildung 32: H3: Auswertung Realismus nach Fahrprofil

Wie bereits in der Auswertung für die Akzeptanz, sind die Mittelwerte beider Fahrprofile kaum zu differenzieren. Ausnahme bildet das Lehnverhalten bei

längeren Kurvenfahrten sowie bei wechselnden Fahrmanövern, wobei ein Trend Richtung Fahrprofil Alt aufzeigt, jedoch keine Signifikanz vorliegt.

Als Vergleich werden die Angaben des Abschlussfragebogens betrachtet, welche eine Bewertung des Fahrgefühls, des Lenkens und des Lehrens zwischen beiden Durchgängen vornimmt (Abbildung 33). In der schematischen Darstellung wird deutlich, dass die Probanden nahezu keine Präferenz zu einem Fahrprofil hatten und beide gleich bewerteten.



Abbildung 33: H3: Auswertung Realismus nach Abschluss

H4: Fahrprofil Neu löst ein stärkeres Präsenzgefühl (Immersionsempfinden) als Fahrprofil Alt aus.

Um die Hypothese hinsichtlich des Präsenzgefühls widerlegen oder bestätigen zu können, wurden die Angaben der VPs aus dem PQ herangezogen, welcher in den Fragebögen „Nach jedem Fahrprofil“ inkludiert ist. Dazu wurden die Mittelwerte, die Standardabweichung sowie der Standardfehler der Angaben gebildet (Tabelle 3) und in einem Diagramm schematisch dargestellt (Abbildung 34). Je höher der erreichte Mittelwert, desto besser ist das Präsenzepfinden in dem jeweiligen Fahrprofil.

Tabelle 3: H4: Ergebnisse Präsenzepfinden

| | Mittelwert \bar{X} | Standardabweichung | Standardfehler |
|-----------------------|----------------------|--------------------|----------------|
| Fahrprofil Alt | 105,56 | 13,84 | 2,66 |
| Fahrprofil Neu | 108,11 | 13,59 | 2,62 |

Die Abbildung 34 zeigt, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Fahrprofilen gibt, jedoch ist ein Trend in Richtung des neuen Fahrprofils erkennbar.

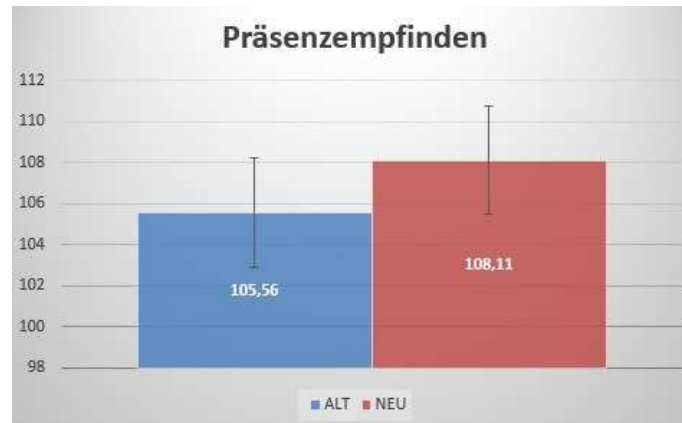


Abbildung 34: H4: Auswertung Präsenzempfinden

H5: Fahrprofil Neu löst einen geringeren Grad an Simulation Sickness als Fahrprofil Alt aus.

Für die Ermittlung der Schwere der Simulation Sickness werden sowohl die Angaben aus dem MISC nach jedem Szenario als auch die Antworten des SSQ nach jedem Durchgang betrachtet. Hierbei gilt, je höher der angegebene Wert der VP, desto schwerer sind die Symptome der Simulatorkrankheit.

Die Ergebnisse des MISC sind in Abbildung 35 und Tabelle 4 dargestellt.

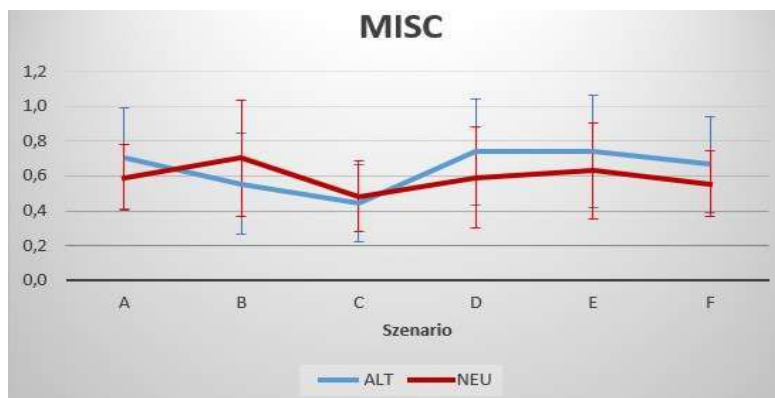


Abbildung 35: H5: Auswertung MISC

Tabelle 4: H5: Ergebnisse MISC

| | Mittelwerte | | | | | | Standardfehler | | | | | |
|------------|-------------|------|------|------|------|------|----------------|------|------|------|------|------|
| | A | B | C | D | E | F | A | B | C | D | E | F |
| Alt | 0,70 | 0,56 | 0,44 | 0,74 | 0,74 | 0,66 | 0,29 | 0,29 | 0,22 | 0,30 | 0,32 | 0,28 |
| Neu | 0,59 | 0,70 | 0,48 | 0,59 | 0,63 | 0,56 | 0,19 | 0,33 | 0,20 | 0,29 | 0,27 | 0,19 |

Die Resultate des SSQ (Übelkeit, Okulomotorik, Desorientierung und Gesamtpunktzahl) sind in Abbildung 36 und Tabelle 5 erkennbar.

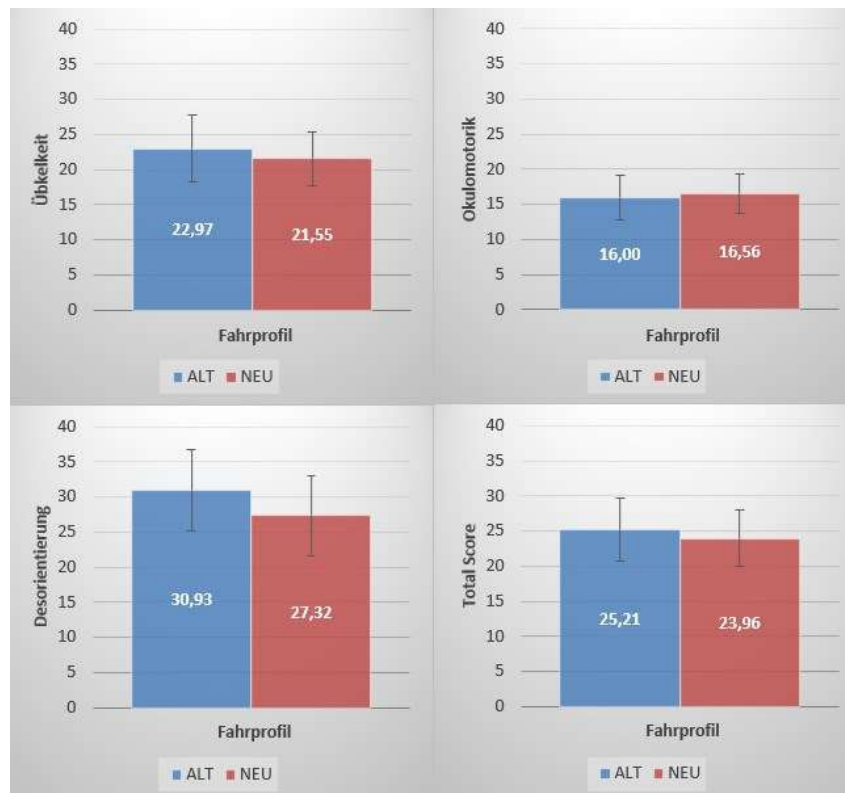


Abbildung 36: H5: Auswertung SSQ

Tabelle 5: H5: Ergebnisse SSQ

| | Mittelwerte \bar{X} | | | |
|-----------------------|---|---------------------|------------------------|--------------------|
| | Übelkeit | Okulomotorik | Desorientierung | Total Score |
| Fahrprofil Alt | 22,97 | 16,00 | 30,93 | 25,21 |
| Fahrprofil Neu | 21,55 | 16,56 | 27,32 | 23,96 |
| | Standardabweichungen | | | |
| | Übelkeit | Okulomotorik | Desorientierung | Total Score |
| Fahrprofil Alt | 24,72 | 16,33 | 30,24 | 23,16 |
| Fahrprofil Neu | 19,73 | 14,72 | 30,02 | 21,11 |
| | Standardfehler | | | |
| | Übelkeit | Okulomotorik | Desorientierung | Total Score |
| Fahrprofil Alt | 4,76 | 3,14 | 5,82 | 4,46 |
| Fahrprofil Neu | 3,80 | 2,83 | 5,78 | 4,06 |

Bei beiden Betrachtungen ist erkennbar, dass eine geringere Simulatorkrankheit (mit Ausnahme des SSQ-Teilbereichs Okulomotorik sowie des MISC nach den Szenarien B und C) beim neuen Fahrprofil erfasst wurde, dessen Wertigkeiten nicht signifikant sind. Des Weiteren ist auffällig, dass die Standardabweichungen des SSQ bei beiden Fahrprofilen nahezu immer höher als der dazugehörige Mittelwert ist, was die Aussagekraft der Werte vermindert.

H6: Die Reihenfolge der Fahrprofile hat einen Einfluss auf die Bewertung.

Bei der Betrachtung der zuvor gestellten Hypothesen wurden die Mittelwerte des jeweiligen Teilbereichs des gesamten Versuchs betrachtet. Um den Einfluss der Reihenfolge (Alt-Neu; Neu-Alt) zu bestimmen, werden die ermittelten Ergebnisse der entsprechenden Gruppierung zugeordnet. Zunächst wird die Akzeptanz beider Gruppen betrachtet (Abbildung 37), wobei die Reihenfolge Alt-Neu zuerst und Neu-Alt als Zweites in der Darstellung genannt wird.

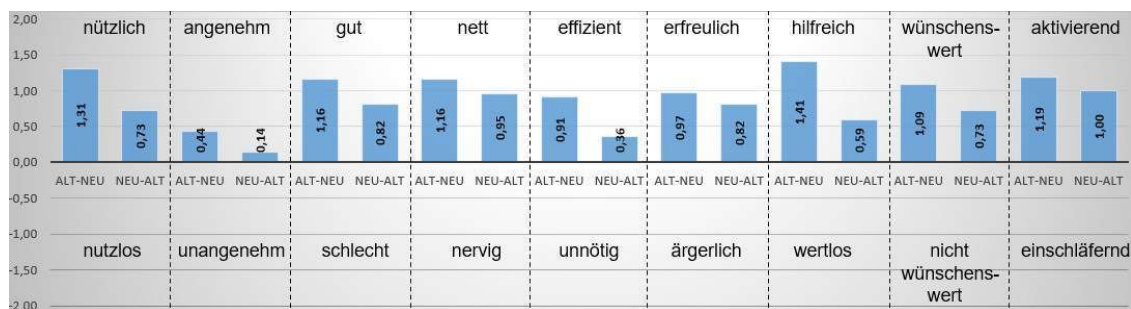


Abbildung 37: H6: Auswertung Akzeptanz Reihenfolge

Hieraus wird erkennbar, dass alle Teilbereiche deutlich besser (überwiegend signifikant) mit der Reihenfolge Alt-Neu bewertet wurden, was auch beim Nützlichkeits- und Zufriedenheitsgrad der Fall ist (Abbildung 38).

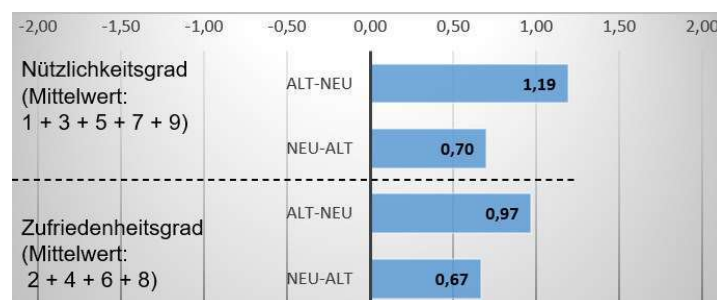


Abbildung 38: H6: Auswertung Nützlichkeits- und Zufriedenheitsgrad Reihenfolge

Ordnet man die Angaben der realismusbezogenen Antworten des Fragebogens „Nach jedem Fahrprofil“ der Reihenfolge zu (Abbildung 39), so ist ebenfalls ein positiver Trend für die Reihenfolge Alt-Neu zu erkennen. Allerdings ist der Unterschied zwischen beiden Varianten nicht markant bzw. signifikant und wurde ähnlich bewertet.

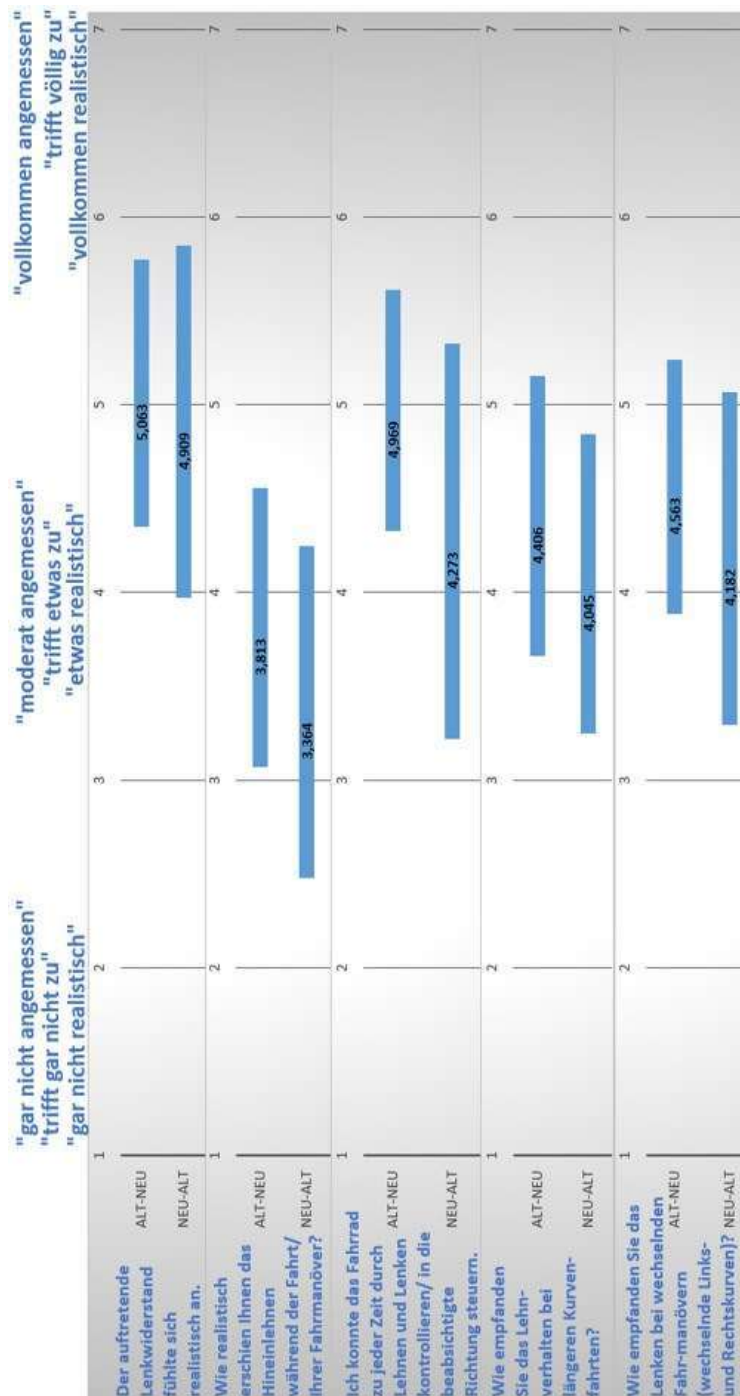


Abbildung 39: H6: Auswertung Realismus Reihenfolge

4 Evaluierung & Validierung der Querdynamik

Bei der Zuordnung der Angaben des Abschlussfragebogens ist festzustellen, dass das Fahrprofil, welches im zweiten Durchgang aktiv geschaltet wurde, eine deutliche Tendenz hervorruft (Abbildung 40). Dies ist sowohl für das alte Fahrprofil als auch das Neue gültig.

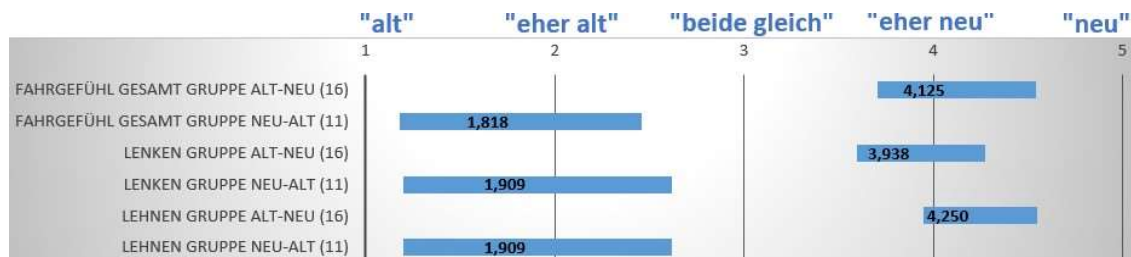


Abbildung 40: H6: Auswertung Realismus nach Abschluss Reihenfolge

Betrachtet man den MISC (Abbildung 41) als auch das Präsenzepfinden (Abbildung 42) entsprechend der Reihenfolge, ist auch in diesem Fall eine Tendenz für die Gruppe Alt-Neu ersichtlich.

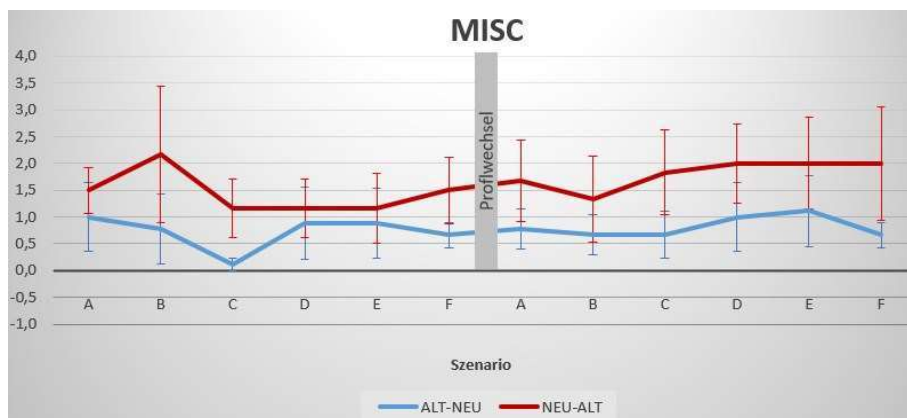


Abbildung 41: H6: Auswertung MISC Reihenfolge



Abbildung 42: H6: Auswertung Präsenzepfinden Reihenfolge

Bei der Betrachtung des SSQ-Abschnitts in abhängig der Reihenfolge (Abbildung 43) kann ebenfalls eine klare Präferenz für die Gruppierung Alt-Neu erkennbar.

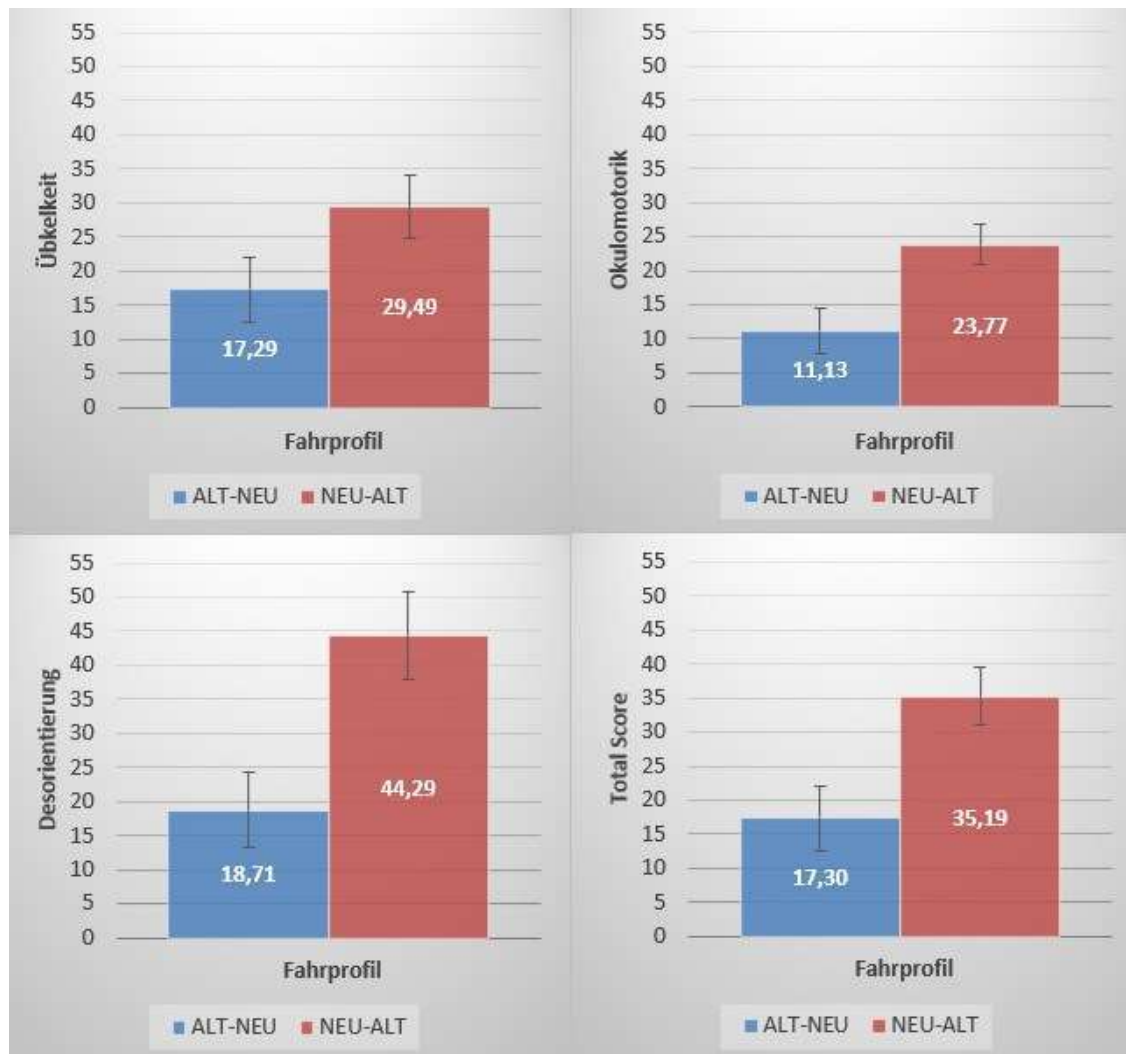


Abbildung 43: H6: Auswertung SSQ Reihenfolge

Es ist festzustellen, dass die Reihenfolge der Fahrprofile einen entscheidenden Einfluss auf die Bewertungen der Probanden hinsichtlich aller subjektiven Kriterien hat. Dieser Reihenfolgen-Effekt muss in zukünftigen Forschungen weiter untersucht werden.

4.4.2 Analyse objektiver Kriterien

Um das Fahrverhalten der einzelnen Probanden zu analysieren, sind während der einzelnen Durchgänge die Geschwindigkeiten und Winkelstellungen bei den Lenk- und Lehnbewegungen aufgezeichnet worden. Anhand dieser dokumentierten Werte können in Kombination mit den Kartenansichten aus der Unreal Engine weitere Aussagen für die Querdynamikanpassungen getroffen werden.

Hierzu wird die Anzahl der Lehnbewegungen innerhalb der gesamten Studie bestimmt. Hierzu wurde eine Hysterese über das Lehnverhalten der VPs gelegt, welche einen Lehnvorgang ab 5° definiert (grün) und nach Unterschreiten von 3° (rot) als abgeschlossen ansieht (Abbildung 44). Die ermittelten Werte über alle VPs sind in Tabelle 6 ersichtlich.

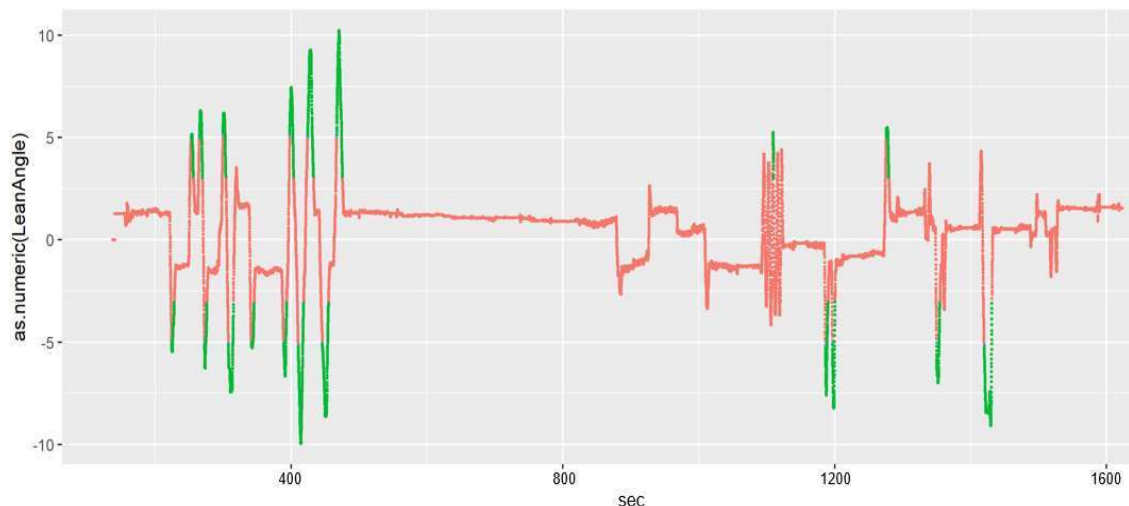


Abbildung 44: Schematische Darstellung der Zählweise der Lehnvorgänge

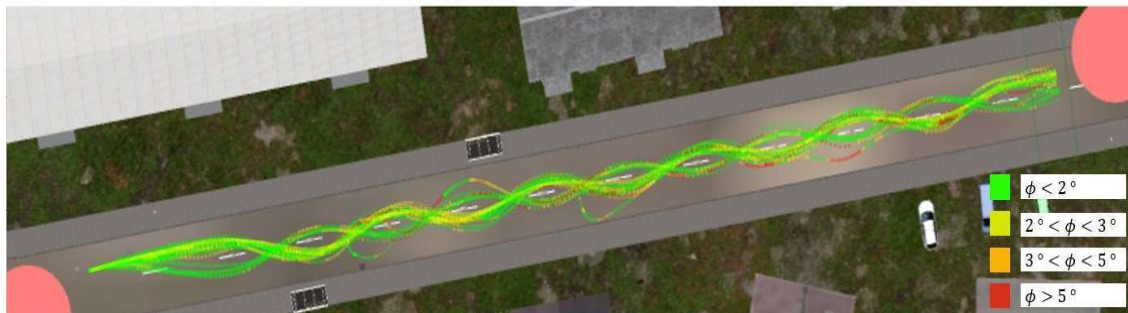
Tabelle 6: Gesamtanzahl der Lehnvorgänge aller Probanden

| Fahrprofil | Gesamt | Mittelwert |
|------------|--------|------------|
| Alt | 294 | 11,76 |
| Neu | 420 | 16,8 |

Es ist erkennbar, dass sich die Probanden mit dem neuen Fahrprofil signifikant mehr gelehnt haben als mit dem alten Setup. Dies gilt sowohl für den Gesamtwert der Lehnvorgänge als auch dem berechneten Durchschnittswert.

Um die Lehnvorgänge weiter zu analysieren, sind die einzelnen Szenarien mit den gemessenen Lenk- und Lehnbewegungen schematisch visualisiert worden. Hierzu wurde das Szenario mit den größten Lehnmöglichkeiten aufgrund der wechselnden Fahrmanöver betrachtet. Abbildung 45 zeigt das Szenario b) (Slalom) aller Probanden mit dem alten Fahrprofil (oben) sowie dem neuen Fahrprofil (unten).

Heatmap Lehnwinkel Profil Alt - Szenario B



Heatmap Lehnwinkel Profil Neu - Szenario B

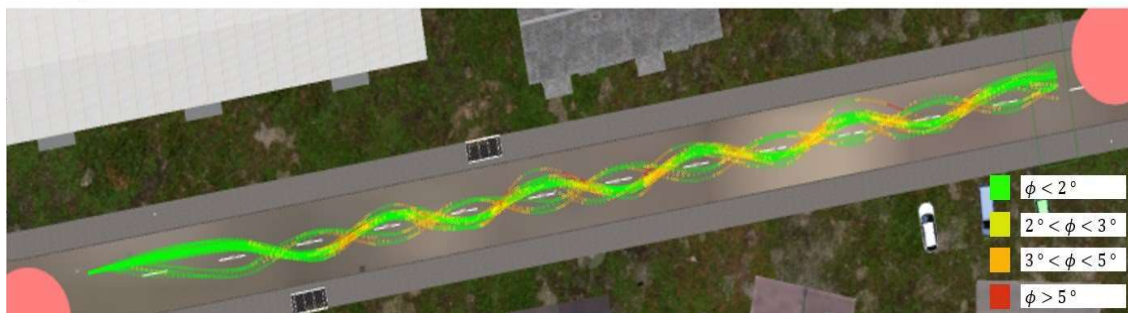


Abbildung 45: Heatmap Szenario b)

Aus dieser sog. Heatmap ist deutlich erkennbar, dass im Fall des neuen Fahrprofils ein Lenkvorgang eine Lehnbewegung verursachte, hingegen wurde beim alten Fahrprofil nur in einigen Teilbereichen ein Lehen durch den Probanden getätigt. Zudem ist ersichtlich, dass einige VPs Schwierigkeiten mit dem alten Lehnverhalten hatten und teilweise den Slalom nicht korrekt durchfahren konnten. Als weiteren Vergleich für die geänderte Dynamik im Bereich des Lehnens dient eine Messung des Szenario b) (Slalom). Die Abbildung 46 zeigt die exemplarische Fahrt eines Probanden über diese Teststrecke.

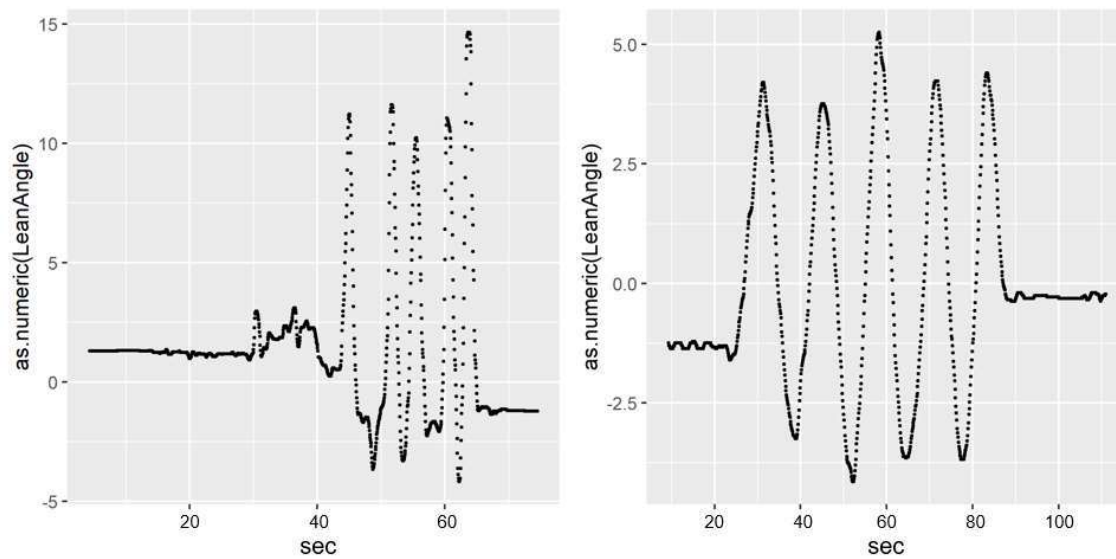


Abbildung 46: Vergleich altes (links) und neues (rechts) Fahrprofil

Aus der oben ersichtlichen Messung und dessen schematischer Darstellung ist das alte Lehnverhalten sehr plötzlich und ein schnelles Erreichen der maximalen Winkelwerte (15°) erkennbar, was für ein unbeabsichtigtes Lehnen der VP spricht. Zusätzlich sind in der links dargestellten Messung ruckartig auftauchende Lehnwinkel ersichtlich, welche für eine instabile Fahrweise sprechen. Hintergrund hierfür ist die Kraftsteuerung der Plattform, welche ab einer gewissen Geschwindigkeit bei geringeren Bewegungen, bspw. beim Antritt zum Erreichen einer höheren Geschwindigkeit, bereits reagiert und das Lehnen freischaltet. Auch das Zurückführen zur Nullstellung der Plattform erfolgt unruhig bzw. sprunghaft. Oftmals wird zudem der Nullpunkt überschritten und es kommt zum Aufschwingen der Plattform. Im Falle des Aufschwingens mussten die Probanden von der VL gestützt werden, um einen Sturz zu vermeiden. Des Weiteren kann man eine Schiefstellung der Bewegungsplattform erkennen, welche sich auch nach einem Lehnvorgang nicht auf die Nullstellung kalibriert. Bei der direkten Gegenüberstellung zum neuen Lehnverhalten ist ein deutlich ruhigeres und natürlicheres Verhalten erkennbar. Auch die Lehnwinkel liegen bei deutlich geringeren Werten (ca. 5°), was ferner für dieses Verhalten spricht. Die Rückführung der Plattform erfolgt über einen längeren Zeitbereich und somit ausgeglichener, ebenfalls wird nach abgeschlossenen Lenkvorgang (Rückführung des Lenkers zur Mitte) die Plattform

auf den Nullpunkt zurückgeführt, sodass auch der Lehnvorgang abgeschlossen ist.

Eine Auswertung aller Teilnehmer des Szenario b) (Slalom) (Abbildung 47) bestätigt diese Annahme der instabilen Fahrweise mit dem alten Fahrprofil (oben) und eine Stabilisierung des Lehnverhaltens inklusive geringerer Lehnwinkel mit dem neuen Fahrprofil (unten). Bei der vorherigen Version ist eine Häufigkeitsdichte der Lehnwinkel um $\pm 1-2^\circ$ sowie vereinzelte Lehnwinkel um $\pm 10^\circ$ deutlich erkennbar, wohingegen das neue Querdynamikkonzept eine Gauß'sche (Glocken-) Verteilung mit geringeren maximalen Lehnwinkeln zeigt.

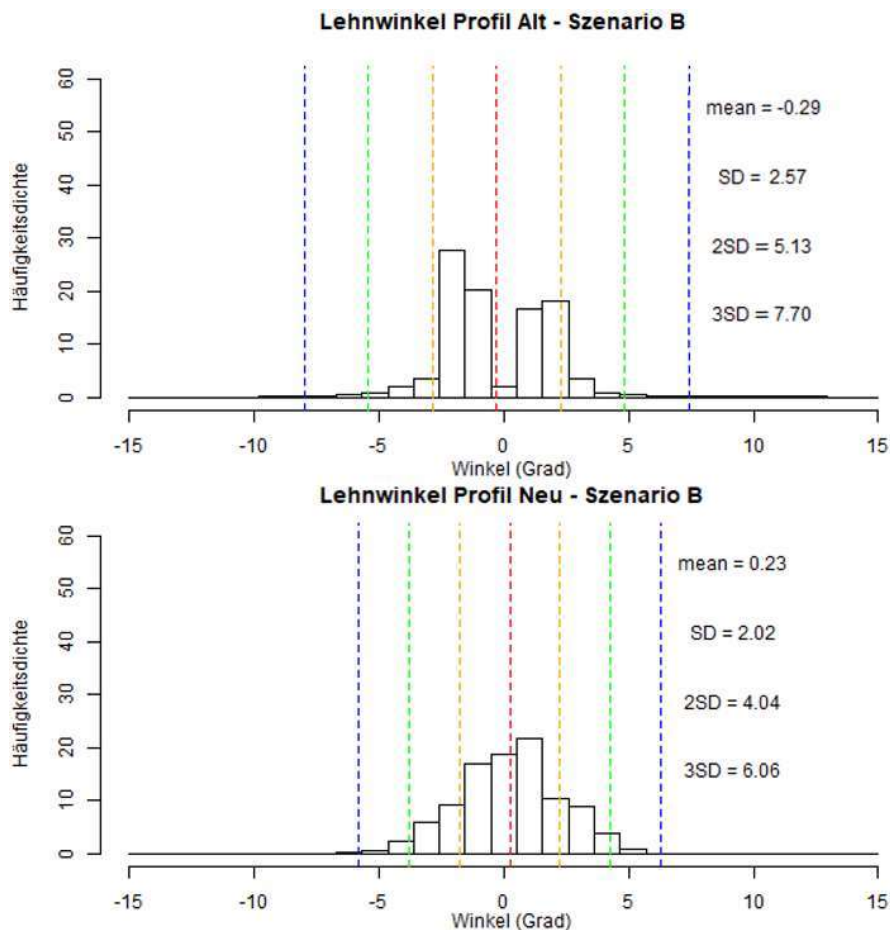


Abbildung 47: Verteilung des Lehnens bei Fahrprofil Alt (links) und Fahrprofil Neu (rechts)

Durch die genannten objektiven Kriterien, wie der stabilen Lehnvorgänge ohne ruckartiges Erreichen der Maximalwerte und des Sicherheitsaspekt, welches ein Aufschwingen der Plattform und so einen Sturz der VP verhindert, ist das neue Fahrprofil als deutlich besser zu bewerten.

5 Schlussfolgerungen

Bezugnehmend auf die Ergebnisse der Kapitel 4.4.1 und 4.4.2 wurde eine erfolgreiche Änderung des Fahrradsimulators erreicht, dessen technische Anpassungen ausführlich in den Kapiteln 3.3 und 3.4 dokumentiert wurden. Die softwareseitigen Veränderungen basieren auf einer ausführlichen Literaturrecherche bezüglich Simulationen, mechanische und physische Eigenschaften von Fahrrädern sowie Dynamikmodellen (Kapitel 2). Dazu wurden sowohl eine Umgestaltung des Gegenmoments des Lenkers anhand eines dynamischen Fahrradmodells als auch eine Veränderung der Ansteuerung der Bewegungsplattform bei Lehnbewegungen realisiert. Das Lehnverhalten wurde in Anlehnung an ein dynamisches Fahrradmodell entwickelt. Hierdurch wurden elementare Sicherheitsrisiken hinsichtlich einer Probandengefährdung beim Aufschwingen der Plattform nachweislich beseitigt.

Nach Implementierung der querdynamischen Optimierungen wurden diese mittels einer Probandenstudie (Kapitel 4) evaluiert und validiert, auf deren Ergebnisse im Weiteren eingegangen wird. Bei den Ergebnissen der Probandenstudie ist anzumerken, dass man sie nicht vollständig der Anpassungen der Querdynamik zuordnen kann, da zeitgleich längsdynamische Optimierungen vorgenommen und in einer gemeinsamen Studie überprüft worden sind. Insgesamt nahmen 35 Probanden an der Studie teil, von denen 27 VPs die Studie erfolgreich abschließen konnten. Dabei erhielten 16 VPs die Reihenfolge Alt-Neu und 11 Personen die Reihenfolge Neu-Alt. Zunächst wurden die subjektiven Merkmale (Kapitel 4.4.1) wie Akzeptanz, Präsenz, Realismus und Simulation Sickness unabhängig der Reihenfolge und in ihrer Gesamtheit ausgewertet. Im Bereich der Akzeptanz und die daraus resultierenden Grade für die Nützlichkeit und der Zufriedenheit des Simulators wurden in vielen Teilbereichen nahezu identisch bewertet und es konnten nur geringe Unterschiede ermittelt werden, jedoch mit einem Trend in Richtung der überarbeiteten Simulatorversion. Bei dem Vergleich hinsichtlich des Präsenzepfindens hat das neue Fahrprofil eine deutlich positivere Tendenz als das alte Fahrprofil

aufgezeigt. Bei der Befragung nach der Schwere der Simulation Sickness und der MISC nach den einzelnen Szenarien ist das neue Fahrprofil ebenfalls geringfügig besser beurteilt worden. Zusätzlich weisen die Werte im Rahmen des SSQ höhere SDs als Mittelwerte auf, sodass diese ebenfalls hinterfragt werden müssen. Mit Ausnahme von längeren Kurvenfahrten und wechselnden Lenkmanövern empfanden die Probanden das neue Fahrprofil zumeist besser hinsichtlich der Realitätsgüte der querdynamischen Aspekte.

Aussagekräftiger war die Auswertung entsprechend der Fahrprofil-Reihenfolge. Generell wurde das jeweilige Fahrprofil des zweiten Durchgangs in Bezug auf die subjektiven Kriterien positiver empfunden, was für einen Gewöhnungs- bzw. Trainingseffekt der Teilnehmer spricht. Insgesamt gesehen wurde die Reihenfolge Alt-Neu, stellenweise signifikant, in allen Bereichen Akzeptanz, Präsenz, Simulation Sickness und Realismus besser bewertet. Werden die ersten Durchgänge beider Reihenfolgen gegenübergestellt, so schneidet das neue Fahrprofil schlechter als das alte Fahrprofil ab. Durch diese Gegenüberstellung lassen sich keine erheblichen Unterschiede differenzieren. Zusätzlich ist anzumerken, dass weniger Teilnehmer der Reihenfolge Neu-Alt (Alt-Neu: 16 zu Neu-Alt: 11) zugeteilt wurden, um eine gleichwertige Auswertung zu ermöglichen und bei der Aussagekraft der Bewertungen berücksichtigt werden sollte. Grundsätzlich ist anzumerken, dass es sich um eine kleine Stichprobengröße handelt und es weitere Studien mit diesem experimentellen Versuchsaufbau bedarf, um aufschlussreichere Ergebnisse bzw. Rückschlüsse für die unterschiedlichen Fahrprofile zu erhalten. Auch die parallel erfolgten Änderungen der Längsdynamik des Fahrradsimulators beeinflussten die subjektiven Einschätzungen der Probanden, sodass eine genaue Zuordnung der einflussreichsten positiven Änderungen nicht möglich ist. Ausnahme bilden hier die explizit-querdynamischen Simulatoreigenschaften und ihrer Realitätsgüte durch individuell konzipierte Fragestellungen. Allerdings kann eine insgesamt gesehen negative Durchführung andere Eigenschaften beeinflussen, sodass auch in diesen Fällen die Ergebnisse kritisch zu hinterfragen sind und eine genaue Auswertung des Realitätsgrades nicht möglich ist.

Im weiteren Schritt wurde das Fahrverhalten anhand objektiver Merkmale ausgewertet (Kapitel 4.4.2). Die Anzahl der Lehnvorgänge war im neuen Fahrprofil signifikant höher als bei der vorherigen Simulatorversion, sodass die Bewertung und Einschätzung der VPs bei den subjektiven Kriterien zu hinterfragen ist. In der Auswertung wurde deutlich, dass das Lehnverhalten des alten Fahrprofils impulsiv und instabil ist. Markant waren hierbei das Zurückführen nach einem Lehnvorgang, welches sprunghaft und unruhig erfolgte. Zudem wurde bei der Rückführung die Nullstellung oftmals überschritten und es trat ein Aufschwingen der Plattform ein. Deutlich wird dies anhand mehrerer kurz aufeinanderfolgender Lehnintervalle, die sich bis an die maximalen Lehngrenzen der Plattform ereigneten. Das Aufschwingen birgt eine hohe Sturzgefahr, was ein Verletzungsrisiko der VPs darstellte. Im direkten Vergleich zum neuen Fahrprofil wurde ein deutlich ruhigeres und natürliches Lehnverhalten ersichtlich. Die Lehnwinkelgrenzen werden hier nicht ausgereizt und das Verfahren der Plattform erfolgte über ein längeres Zeitintervall, wodurch ein ausgeglicheneres Lehnen der VPs ermöglicht wurde. Des Weiteren wurde nach den Lehnvorgängen die Nullstellung der Plattform erreicht, womit einem Aufschaukeln der Bewegungsplattform entgegengewirkt wird. Insgesamt stellt das neue Fahrprofil eine deutliche Stabilisierung der Fahrweise dar. Hierdurch wurde die Sicherheit des Simulators gesteigert und das Verletzungsrisiko der Probanden drastisch reduziert.

Vor allem in Anbetracht der objektiven Auswertung sind die Überarbeitungen der querdynamischen Force-Feedback-Komponenten als erfolgreich anzusehen. Dennoch sollten weitere Forschungen auf Grundlage der ähnlichen Bewertungen der gesamtheitlichen Fahrprofile und im Hinblick auf den Reihenfolgen-Effekt durchgeführt und analysiert werden.

6 Zusammenfassung

Die Hauptaufgabe dieser Thesis liegt darin, den vorhandenen Fahrradsimulator des DLR Instituts TS-VUV in Braunschweig in Bezug auf die querdynamischen Aspekte wie Lenken und Lehnen im Rahmen softwaretechnischer Änderungen zu verbessern. Vor diesem Hintergrund wurde der BikeSim entsprechend analysiert, mit Arbeiten anderer Forschungseinrichtungen verglichen und überarbeitet.

Die zentralen Punkte der Arbeit umfassen sowohl die Berechnung des Widerstandsmoments des Lenkers als auch die Ansteuerung der Bewegungsplattform zur Realisierung des Lehnverhaltens eines Fahrrads bzw. Fahrradfahrers. Diese wurden an eine dynamische Fahrradmodellierung nach Whipple angeglichen, um ein realistisches Fahrerlebnis und Fahrradverhalten zu generieren. In diesem Zuge wurden die entsprechenden Programmabschnitte für die notwendigen Berechnungen der Force Feedback Komponenten erstellt und in die DLR Softwareumgebung Dominion implementiert und erprobt.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wurden die Änderungen im Bereich der Querdynamik durch eine Probandenstudie mittels subjektiver Anforderungen, wie Akzeptanz, Präsenz, Realismus und Simulatorkrankheit, sowie objektiver Kriterien, wie das Fahrverhalten, mit der bisherigen Simulatorversion verglichen und validiert. Die Subjektivbeurteilung erfolgte durch diverse Fragebögen, welche zur Bewertung beider Versionen bzw. Fahrprofile herangezogen wurden. Die gesamtheitlichen Bewertungen für das neuentwickelte Fahrprofil wies einen positiven Trend in Bezug auf Akzeptanz und Präsenz auf, im Falle der Simulation Sickness und der Realitätsgüte konnten ähnliche Bewertungen geschlossen werden. Bei Betrachtung der jeweiligen Reihenfolge (Alt-Neu und Neu-Alt) wurde ersichtlich, dass das Fahrprofil des zweiten Durchgangs immer eine positivere Wertung erhielt. Hierbei war ebenfalls zu erkennen, dass die neue Version im Vergleich zum vorherigen Fahrprofil eine Verbesserung darstellt. Hingegen wurde das neuerstellte Fahrprofil am Anfang der Studie

schlechter empfunden, sodass keine klare Differenzierbarkeit zwischen den Fahrprofilen laut subjektiven Einschätzungen vorliegt.

Jedoch zeigt die objektive Auswertung eine klare Tendenz in Richtung der neuen querdynamischen Aspekte. Besonders das Lehnverhalten der Bewegungsplattform erfolgte bei dem ursprünglichen Setup aufgrund einer Kraftsteuerung impulsiv und ruppig, sodass sich Probanden bei unbeabsichtigten Lehnmanövern, bspw. hervorgerufen durch einen Antritt bei Überhol- oder stark wechselnden Fahrmanövern, zumeist am jeweiligen Maximalwert des Lehnwinkels befanden. Zusätzlich wurde durch ein Zurückfedern über die Nullstellung der Plattform eine Pendelbewegung hervorgerufen, welches eine Gefährdung der VPs im Falle eines Sturzes darstellt. Durch die Umstellung der Ansteuerung auf eine Positionsregelung erfolgen die Lehnbewegungen über ein längeres Zeitintervall, was ein harmonisches und vor allem sicheres Fahrmänover ermöglicht. Nach einem abgeschlossenen Lehnvorgang wird das Fahrrad langsam in eine aufrechte Position zurückgeschwenkt. Durch diesen Ansatz wird ein Pendeln verhindert, was als Sicherheitsmerkmal zu definieren ist.

Wenn auch im Falle der subjektiven Auswertung keine klare Differenzierung gegenüber dem ursprünglichen System herausgestellt werden kann, so sind die querdynamischen Anpassungen insbesondere anhand der objektiven Bewertung als erfolgreiche Optimierungen zu erachten. Daher sind weitere Forschungen notwendig, auf die im folgenden Kapitel weiter eingegangen wird.

7 Ausblick

Da die neuaufgesetzte Querdynamik in Anbetracht der subjektiven Einschätzung der Probanden zum vorherigen System nicht differenzierbar war, sollten weitere Arbeiten am dynamischen Modell zur Optimierung getätigt werden. Mögliche technische Verbesserungen sind u.a.:

- Erfassen des Lehnwinkels oder des Lehdrehmoments des Fahrers mittels Sensorik und Übertragung dessen auf die Positionssteuerung der Plattform, um dynamisches Modell komplett implementieren zu können
- „Bleeding“- / Rückführungsfaktor und Verfahrgeschwindigkeit erhöhen, um Nullstellung der Plattform schneller zu erreichen bzw. einer eventuellen Schiefelage weiter entgegenzuwirken
- Gegenmoment des Lenkers höher faktorisieren, um den Lenkwiderstand realistischer bzw. stärker zu gestalten
- Auslenkung der Plattform erst ab höherem Lenkwinkelbereich (bspw. $\pm 0,131$ rad bzw. $\pm 7,5^\circ$) zulassen
- Feinabstimmung der Formeln mit neuen Messungen realer Fahrten mit einem Fahrrad

Um die Studiendurchführung effizienter und zielgerichteter zu gestalten, können die folgenden Verbesserungsvorschläge umgesetzt werden:

- Einteilung der VPs in Kategorien / Typen, um bessere Gewichtung zu erschaffen
- Stichprobengröße erhöhen, um etwaigen Ausfällen entgegenzuwirken
- Anpassung der Skalierungen innerhalb der Fragebögen an gerade Einteilung, um Präferenz zu einem Fahrprofil zu erzwingen
- Studiendurchführung nur für eine Änderung aufsetzen, um eindeutige Schlüsse ziehen zu können

Literaturverzeichnis

Albert Einstein (14.03.1879—18.04.1955). (o. J.). <https://www.zitate.eu>. Abgerufen 24. November 2022, von <https://www.zitate.eu/autor/albert-einstein-zitate/88020>

Ansariyar, A., Sadeghvaziri, E., & Jeyhani, M. (2022). Systematic Review of Bike Simulator Studies. *Journal of Science and Cycling*, 11(1), 5–29. <https://doi.org/10.28985/1322.jsc.01>

Åström, K. J., Klein, R. E., & Lennartsson, A. (2005). Bicycle dynamics and control: Adapted bicycles for education and research. *IEEE Control Systems Magazine*, 25(4), 26–47. <https://doi.org/10.1109/MCS.2005.1499389>

BMDV - Unfallverhütungsbericht 2018/2019. (2021). <https://bmdv.bund.de>. Abgerufen 24. September 2022, von <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/K/unfallverhuetungsbericht-2018-2019.html>

Bos, J., Mackinnon, S., & Patterson, A. (2006). Motion Sickness Symptoms in a Ship Motion Simulator: Effects of Inside, Outside and No View. *Aviation, space, and environmental medicine*, 76, 1111–1118.

BSH1003P31A2A - Servomotor, Lexium BSH, 100mm, 8,0Nm, Passfeder IP65, Singelturn 128P/U, 2xM23 abgewinkelt | Schneider Electric Deutschland. (o. J.). Abgerufen 10. Dezember 2022, von <https://www.se.com/de/de/product/BSH1003P31A2A/servomotor-lexium-bsh-100mm-80nm-passfeder-ip65-singelturn-128p-u-2xm23-abgewinkelt/>

Croon, L. (1939). *Das Fahrrad und seine Entwicklung*. VDI-Verlag.

Dialynas, G., Happee, R., & Schwab, A. L. (2019). Design and hardware selection for a bicycle simulator. *Mechanical Sciences*, 10(1), 1–10. <https://doi.org/10.5194/ms-10-1-2019>

García, D. M., & Gröne, K. (2022). *Datenauswertung*. DLR Wiki. Abgerufen 22. November 2022, von <https://wiki.dlr.de/pages/viewpage.action?spaceKey=TSSim&title=Datenauswertung>

García, D. M., & Gröne, K. (2022a). *Fahrprofile*. DLR Wiki. Abgerufen 1. Dezember 2022, von <https://wiki.dlr.de/display/TSSim/Fahrprofile+bzw.+Programme>

García, D. M., & Gröne, K. (2022b). *Messungen für LUTs*. DLR Wiki. Abgerufen 5. August 2022, von <https://wiki.dlr.de/pages/viewpage.action?pagelId=476842270>

García, D. M., & Gröne, K. (2022c). *Szenarien*. DLR Wiki. Abgerufen 22. November 2022, von <https://wiki.dlr.de/display/TSSim/Szenarien+BikeEval2>

García, D. M., & Gröne, K. (2022d). *Versuchsplan*. DLR Wiki. Abgerufen 15. November 2022, von <https://wiki.dlr.de/display/TSSim/Versuchsplan+BikeEval2>

García, D. M., Gröne, K., Quante, L., Fischer, M., Thal, S., & Henze, R. (2022). *Parameter tuning of a bicycle simulator for a realistic riding behaviour and motion perception*. 1–8.

Garmin, & subsidiaries, G. L. or its. (o. J.). *Tacx FLUX 2 Smart-Trainer*. Garmin. Abgerufen 10. Dezember 2022, von <https://www.garmin.com/de-DE/p/690887>

Gass, S. I., & Fu, M. C. (Hrsg.). (2013). Simulator. In *Encyclopedia of Operations Research and Management Science* (S. 1423–1423). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1153-7_200771

Jurczok, F. (2021). *Fahrrad-Monitor Deutschland 2021*. 1–220.

Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203–220. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3

Kuiper, O. X., Bos, J. E., & Diels, C. (2019). Vection does not necessitate visually induced motion sickness. *Displays*, 58, 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2018.10.001>

Lessing, H.-E., & Hadland, T. (2021). *Evolution des Fahrrads*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-63487-5>

Likert, R. (1932). *A technique for the measurement of attitudes*. The Science Press.

Limebeer, D. J. N., & Sharp, R. S. (2006). Bicycles, motorcycles, and models. *IEEE Control Systems Magazine*, 26(5), 34–61. <https://doi.org/10.1109/MCS.2006.1700044>

Lipinski, K. (2014). *Wertetabelle*. ITWissen.info. Abgerufen 4. August 2022, von <https://www.itwissen.info/Wertetabelle-lookup-table-LUT.html>

Lunze, J. (2013). *Regelungstechnik 1*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29533-1>

Meijaard, J. P., Papadopoulos, J. M., Ruina, A., & Schwab, A. L. (2007). *Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: A benchmark and review*. 63.

Moore, J. K. (2012). *Human Control of a Bicycle*. 1–319.

Moore, J. K., Hubbard, M., Schwab, A. L., & Kooijman, J. D. G. (2010). *Accurate Measurement of Bicycle Parameters*. 1–23.

MoSAIC: Multi-User-Simulation zur Erprobung kooperativer Fahrerassistenz. (o. J.). DLR Verkehr. Abgerufen 27. November 2022, von <https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/mosaic-multi-user-simulation-zur-erprobung-kooperativer-fahrerassistenz>

Reason, J. T. (1978). Motion Sickness Adaptation: A Neural Mismatch Model. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 71(11), 819–829. <https://doi.org/10.1177/014107687807101109>

Sauerbier, T. (1999). *Theorie und Praxis von Simulationssystemen* (O. Mildenerger, Hrsg.). Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-90773-8>

Schulzyk, O., Bongartz, J., Bildhauer, T., Hartmann, U., Goebel, B., Herpers, R., & Reinert, D. (2007). A Bicycle Simulator Based on a Motion Platform in a Virtual Reality Environment—FIVIS Project. In T. M. Buzug, D. Holz, J. Bongartz, M. Kohl-Bareis, U. Hartmann, & S. Weber (Hrsg.), *Advances in Medical Engineering* (Bd. 114, S. 323–328). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68764-1_54

Schwab, A. L., & Recuero, A. M. (2013). *Design and experimental validation of a haptic steering interface for the control input of a bicycle simulator*. 103–110.

Shoman, M., & Imine, H. (2020). *Modelling and Simulation of Bicycle Dynamics* (S. 1–10). <https://doi.org/10.26226/morressier.5e4fe9c06bc493207536f8d1>

SIMUMAK. (2020). *Benutzerhandbuch SMK SMB 2DOFMB* (1. Aufl.).

Sun, C., & Qing, Z. (2018). Design and Construction of a Virtual Bicycle Simulator for Evaluating Sustainable Facilities Design. *Advances in Civil Engineering, 2018*, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2018/5735820>

T-Test, Chi-Quadrat, ANOVA, Regression, Korrelation... (o. J.). Abgerufen 4. Dezember 2022, von <https://datatab.de/tutorial/tabelle-t-verteilung>

Van Der Laan, J. D., Heino, A., & De Waard, D. (1997). A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 5(1), 1–10. [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(96\)00025-3](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(96)00025-3)

Wertheim, A. H., Bos, J. E., & Bles, W. (1998). Contributions of roll and pitch to sea sickness. *Brain Research Bulletin*, 47(5), 517–524. [https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(98\)00098-7](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(98)00098-7)

Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3), 225–240. <https://doi.org/10.1162/105474698565686>

Yin, S., & Yin, Y. (2006). Implementation of the Interactive Bicycle Simulator with Its Functional Subsystems. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 7(2), 160–166. <https://doi.org/10.1115/1.2720885>

Young, S. D., Adelstein, B. D., & Ellis, S. R. (2006). Demand Characteristics of a Questionnaire Used to Assess Motion Sickness in a Virtual Environment. *IEEE Virtual Reality Conference (VR 2006)*, 97–102. <https://doi.org/10.1109/VR.2006.44>

Anlagenverzeichnis

| | |
|---|--------|
| Anhang A – Datenblätter | - 1 - |
| Anhang B – Programmcodes | - 25 - |
| Anhang C – Fragebögen | - 36 - |
| Anhang D – Auswertung Probandenstudie | - 60 - |

Anhang A – Datenblätter

Servomotor

Produktdatenblatt Technische Daten

BSH1003P31A2A

AC-Servomotor BSH, 7,8 Nm, 6000 U/min, m.
Passfeder, o. Bremse, IP65

Verfügbarkeit : Lieferbar



Hauptmerkmale

| | |
|-----------------------------|--|
| Produkt oder Komponententyp | Servo motor |
| Kurzbezeichnung des Geräts | BSH |
| Max. mechanische Drehzahl | 6000 U/min |
| Dauermoment im Stillstand | 8 Nm für LXM32.D30N4 10 A bei 400 V 3 Phasen 8 Nm für LXM32.D30N4 10 A bei 480 V 3 Phasen 7.8 Nm für LXM05CD28M2 bei 200...240 V Einzelphase 7.8 Nm für LXM05AD28M2 bei 200...240 V Einzelphase 7.8 Nm für LXM05BD28M2 bei 200...240 V Einzelphase 7.8 Nm für LXM05BD34N4 bei 380...480 V 3 Phasen 7.8 Nm für LXM05BD42M3X bei 200...240 V 3 Phasen 7.8 Nm für LXM05CD34N4 bei 380...480 V 3 Phasen 7.8 Nm für LXM05CD42M3X bei 200...240 V 3 Phasen 6.7 Nm für LXM15LD21M3 bei 230 V 3 Phasen 6.7 Nm für LXM15LD17N4 bei 230 V 3 Phasen 6.7 Nm für LXM15LD17N4 bei 400 V 3 Phasen 6.7 Nm für LXM15LD17N4 bei 480 V 3 Phasen 7.8 Nm für LXM15LD28M3 bei 230 V 3 Phasen 7.8 Nm für LXM15MD28N4 bei 400 V 3 Phasen 7.8 Nm für LXM15MD28N4 bei 480 V 3 Phasen 7.8 Nm für LXM15MD40N4 bei 400 V 3 Phasen 7.8 Nm für LXM15MD40N4 bei 480 V 3 Phasen 7.8 Nm für LXM05AD34N4 bei 380...480 V 3 Phasen 7.8 Nm für LXM05AD42M3X bei 200...240 V 3 Phasen |
| Spitzenmoment im Stillstand | 28,3 Nm für LXM32.D30N4 10 A bei 400 V 3 Phasen 28,3 Nm für LXM32.D30N4 10 A bei 480 V 3 Phasen 19.69 Nm für LXM05AD28M2 bei 200...240 V Einzelphase 19.69 Nm für LXM05BD28M2 bei 200...240 V Einzelphase 19.69 Nm für LXM05CD28M2 bei 200...240 V Einzelphase 15.5 Nm für LXM15LD21M3 bei 230 V 3 Phasen 12.5 Nm für LXM15LD17N4 bei 230 V 3 Phasen 12.5 Nm für LXM15LD17N4 bei 400 V 3 Phasen 12.5 Nm für LXM15LD17N4 bei 480 V 3 Phasen 19.69 Nm für LXM15LD28M3 bei 230 V 3 Phasen 19.69 Nm für LXM15MD28N4 bei 400 V 3 Phasen 19.69 Nm für LXM15MD28N4 bei 480 V 3 Phasen 23.17 Nm für LXM15MD40N4 bei 400 V 3 Phasen 23.17 Nm für LXM15MD40N4 bei 480 V 3 Phasen |

07.06.2019

Ulrich & Schnepfener
@Ulrich

1

Haltungsverhalten: Diese Dokumentenblätter sind nicht als Ersatz für die Beurteilung der Eignung oder Verlässlichkeit dieser Produkte für bestimmte Verwendungsbereiche des Ersetzers und der Endnutzer zu dienen. Zweckverwendet werden.

| | |
|-------------------------|---|
| | <p>23.01 Nm für LXM05AD34N4 bei 380...480 V 3 Phasen 23.17 Nm für LXM05AD42M3X bei 200...240 V 3 Phasen 23.01 Nm für LXM05BD34N4 bei 380...480 V 3 Phasen 23.17 Nm für LXM05BD42M3X bei 200...240 V 3 Phasen 23.01 Nm für LXM05CD34N4 bei 380...480 V 3 Phasen 23.17 Nm für LXM05CD42M3X bei 200...240 V 3 Phasen</p> |
| Nennleistung am Ausgang | <p>2000 W für LXM32.D30N4 10 A bei 400 V 3 Phasen 2600 W für LXM32.D30N4 10 A bei 480 V 3 Phasen 1100 W für LXM05AD28M2 bei 200...240 V Einzelphase 1100 W für LXM05BD28M2 bei 200...240 V Einzelphase 1100 W für LXM05CD28M2 bei 200...240 V Einzelphase 1100 W für LXM05AD42M3X bei 200...240 V 3 Phasen 1100 W für LXM05BD42M3X bei 200...240 V 3 Phasen 1100 W für LXM05CD42M3X bei 200...240 V 3 Phasen 1300 W für LXM15LD28M3 bei 230 V 3 Phasen 1700 W für LXM15LD17N4 bei 230 V 3 Phasen 1700 W für LXM15LD21M3 bei 230 V 3 Phasen 1800 W für LXM05AD34N4 bei 380...480 V 3 Phasen 1800 W für LXM05BD34N4 bei 380...480 V 3 Phasen 1800 W für LXM05CD34N4 bei 380...480 V 3 Phasen 2000 W für LXM15MD28N4 bei 400 V 3 Phasen 2000 W für LXM15MD40N4 bei 400 V 3 Phasen 2200 W für LXM15LD17N4 bei 400 V 3 Phasen 2200 W für LXM15MD28N4 bei 480 V 3 Phasen 2200 W für LXM15MD40N4 bei 480 V 3 Phasen 2300 W für LXM15LD17N4 bei 480 V 3 Phasen</p> |
| Nenn Drehmoment | <p>6.3 Nm für LXM32.D30N4 10 A bei 400 V 3 Phasen 6.3 Nm für LXM32.D30N4 10 A bei 480 V 3 Phasen 6.73 Nm für LXM05AD28M2 bei 200...240 V Einzelphase 6.73 Nm für LXM05BD28M2 bei 200...240 V Einzelphase 6.73 Nm für LXM05CD28M2 bei 200...240 V Einzelphase 3.7 Nm für LXM15LD17N4 bei 480 V 3 Phasen 4.6 Nm für LXM15MD28N4 bei 480 V 3 Phasen 4.6 Nm für LXM15MD40N4 bei 480 V 3 Phasen 4.7 Nm für LXM15LD17N4 bei 400 V 3 Phasen 5 Nm für LXM15MD28N4 bei 400 V 3 Phasen 5 Nm für LXM15MD40N4 bei 400 V 3 Phasen 5.7 Nm für LXM05AD34N4 bei 380...480 V 3 Phasen 5.7 Nm für LXM05BD34N4 bei 380...480 V 3 Phasen 5.7 Nm für LXM05CD34N4 bei 380...480 V 3 Phasen 6 Nm für LXM15LD17N4 bei 230 V 3 Phasen 6 Nm für LXM15LD21M3 bei 230 V 3 Phasen 6.3 Nm für LXM15LD28M3 bei 230 V 3 Phasen 6.73 Nm für LXM05AD42M3X bei 200...240 V 3 Phasen 6.73 Nm für LXM05BD42M3X bei 200...240 V 3 Phasen 6.73 Nm für LXM05CD42M3X bei 200...240 V 3 Phasen</p> |
| Nenn Drehzahl | <p>4000 rpm für LXM32.D30N4 10 A bei 480 V 3 Phasen 3000 U/Min für LXM32.D30N4 10 A bei 400 V 3 Phasen 1500 U/Min für LXM05AD28M2 bei 200...240 V Einzelphase 1500 U/Min für LXM05BD28M2 bei 200...240 V Einzelphase 1500 U/Min für LXM05CD28M2 bei 200...240 V Einzelphase 4500 rpm für LXM15LD17N4 bei 400 V 3 Phasen 6000 rpm für LXM15LD17N4 bei 480 V 3 Phasen 1500 U/Min für LXM05AD42M3X bei 200...240 V 3 Phasen 1500 U/Min für LXM05BD42M3X bei 200...240 V 3 Phasen 1500 U/Min für LXM05CD42M3X bei 200...240 V 3 Phasen 2000 rpm für LXM15LD28M3 bei 230 V 3 Phasen 2500 rpm für LXM15LD17N4 bei 230 V 3 Phasen 2500 rpm für LXM15LD21M3 bei 230 V 3 Phasen 3000 U/Min für LXM05AD34N4 bei 380...480 V 3 Phasen 3000 U/Min für LXM05BD34N4 bei 380...480 V 3 Phasen 3000 U/Min für LXM05CD34N4 bei 380...480 V 3 Phasen 4000 rpm für LXM15MD28N4 bei 400 V 3 Phasen 4000 rpm für LXM15MD40N4 bei 400 V 3 Phasen 4500 rpm für LXM15MD28N4 bei 480 V 3 Phasen 4500 rpm für LXM15MD40N4 bei 480 V 3 Phasen</p> |
| Produktkompatibilität | <p>LXM05AD28M2 bei 200...240 V Einzelphase LXM05BD28M2 bei 200...240 V Einzelphase LXM05CD28M2 bei 200...240 V Einzelphase LXM15LD21M3 bei 230 V 3 Phasen LXM05AD42M3X bei 200...240 V 3 Phasen LXM05BD42M3X bei 200...240 V 3 Phasen LXM05CD42M3X bei 200...240 V 3 Phasen LXM15LD17N4 bei 230 V 3 Phasen</p> |

LXM15LD17N4 bei 400 V 3 Phasen
LXM15LD17N4 bei 480 V 3 Phasen
LXM15LD28M3 bei 230 V 3 Phasen
LXM05AD34N4 bei 380...480 V 3 Phasen
LXM05BD34N4 bei 380...480 V 3 Phasen
LXM05CD34N4 bei 380...480 V 3 Phasen
LXM15MD28N4 bei 400 V 3 Phasen
LXM15MD28N4 bei 480 V 3 Phasen
LXM15MD40N4 bei 400 V 3 Phasen
LXM15MD40N4 bei 480 V 3 Phasen
LXM32.D30N4 bei 400 V 3 Phasen
LXM32.D30N4 bei 480 V 3 Phasen

| | |
|------------------------------------|---|
| Wellenende | Mit Passfeder |
| Schutzart (IP) | IP65 (Standard) IP67 (mit IP 67-Set) |
| Auflösung Geschwindigkeitsfeedback | 131072 Punkte/Umdrehung |
| Haltebremse | Ohne |
| Montagehalterung | Internationaler Standardflansch |
| Elektrische Verbindung | Drehbare Winkelstecker |

Zusatzmerkmale

| | |
|----------------------------------|---|
| Kompatible Produktfamilie | Lexium 05 Lexium 15 Lexium 32 |
| Max. Spannungsversorgung | 480 V |
| Ausgangsrelais | 3 Phasen |
| Dauerstrom im Stillstand | 6,8 A |
| Max. Dauerleistung | 3,14 W |
| Maximaler Strom I _{rms} | 28,3 A für LXM05AD28M2 28,3 A für LXM05AD34N4 28,3 A für LXM05AD42M3X 28,3 A für LXM05BD28M2 28,3 A für LXM05BD34N4 28,3 A für LXM05BD42M3X 28,3 A für LXM05CD28M2 28,3 A für LXM05CD34N4 28,3 A für LXM05CD42M3X 28,3 A für LXM15LD17N4 28,3 A für LXM15LD21M3 28,3 A für LXM15LD28M3 28,3 A für LXM15MD28N4 28,3 A für LXM15MD40N4 28,3 A für LXM32.D30N4 |
| Max. Dauerstrom | 28,3 A |
| Taktfrequenz | 8 kHz |
| Zweite Welle | Ohne zweites Wellenende |
| Wellendurchmesser | 19 mm |
| Wellenlänge | 40 mm |
| Breite Passfeder | 30 mm |
| Art der Rückkopplung | SinCos Hiperface Singletum |
| Motorflanschgröße | 100 mm |
| Anzahl an Motorstufen | 3 |
| Drehmomentkonstante | 1,22 Nm/A bei 120 °C |
| Gegen-EMK konstant | 77 V/krpm bei 120 °C |
| Anzahl Motorpole | 8 |
| Rotorträgheit | 3,22 kg·cm² |
| Statorwiderstand | 1,43 Ohm bei 20 °C |
| Statorinduktivität | 8,8 mH bei 20 °C |
| Stator elektrische Zeitkonstante | 6,15 ms bei 20 °C |
| Maximale Radialkraft Fr | 1050 N bei 1000 U/min 660 N bei 4000 U/min 730 N bei 3000 U/min |

| | |
|---------------------------------------|-------------------------|
| | 830 N bei 2000 U/min |
| Max. Axialkraft Fa | 0,2 x Fr |
| Kühlungstyp | Lüftelos mit Konvektion |
| Länge | 240,5 mm |
| Zentrieren des Bunddurchmessers | 95 mm |
| Zentrierbundtiefe | 3,5 mm |
| Anzahl der Montagebohrungen | 4 |
| Durchmesser der Montagebohrungen | 9 mm |
| Kreisdurchmesser der Montagebohrungen | 115 mm |
| Produktgewicht | 7,4 kg |

Nachhaltigkeit

| | |
|--------------------------------|--|
| Grad der Umweltverträglichkeit | Green-Premium-Produkt |
| ROHS | Konform Schneider-Electric-Konformitätserklärung |
| REACH | Produkt beinhaltet besorgniserregende Stoffe (SVHC) nicht über dem Schwellwert Produkt beinhaltet besorgniserregende Stoffe (SVHC) nicht über dem Schwellwert |
| Umgebungsbedingungen Produkt | Verfügbar |
| Entsorgungshinweise | Keine spezifischen Recyclingtätigkeiten erforderlich |

Vertragliche Gewährleistung

| | |
|---------|-----------|
| Periode | 18 Monate |
|---------|-----------|

Bewegungsplattform



SMKSMB_2DOFMB User Manual

○ V 1.0: 01/01/2020



INDEX

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | About this product..... | 4 |
| 2. | Basic specifications..... | 4 |
| 2.1. | Components of the system..... | 4 |
| 2.2. | System performance..... | 5 |
| 2.3. | Payload specification..... | 6 |
| 2.4. | Main dimensions..... | 6 |
| 2.5. | Power requirements..... | 6 |
| 2.6. | Diagrams and schemas..... | 6 |
| 3. | Operation procedure..... | 12 |
| 3.1. | Start up procedure..... | 12 |
| 3.2. | Testing and play procedure..... | 13 |
| 3.2.1. | Input/output tab..... | 14 |
| 3.2.2. | Motion platform tab..... | 15 |
| 3.2.3. | Common errors launching the application..... | 16 |
| 3.3. | Switch off procedure..... | 16 |
| 4. | Software integration..... | 17 |
| 4.1. | Basic concepts..... | 17 |
| 4.2. | Api of functions..... | 18 |
| 4.3. | Smkbabelconfig.ini file..... | 21 |
| 4.4. | Working with the sample source code..... | 21 |





1. ABOUT THIS PRODUCT

SMKSMB_2DOFMB is a two freedom degrees' motion platform. It reproduces a pitch and roll movement that simulate the motorcyclist sensation during the ride.

A support or base is part of the motion platform where any suitable structure can be installed in order to simulate different situations by distributing its weight.

An Ethernet communication system is provided to allow a par and speed real time configuration of each movement axle. *SMKSMB_2DOFMB* provides also the read/write of its controller board with 23 digital inputs, 6 analogue inputs, 2 load cells and 4 digital outputs.

2. BASIC SPECIFICATIONS.

2.1. COMPONENTS OF THE SYSTEM.

Items included in the packaging:

- *SMKSMB_2DOFMB* motion platform.
- *Pendrive with DLL and client application with source code.*
- 5 m power supply cable.
- Emergency stop switch with a 5 m cable.
- USB Joystick.
- *SMKSMB_2DOFMB* manual.





2.2. SYSTEM PERFORMANCE

| | Min / max excursion | Speed - Acceleration |
|------------|---------------------|-----------------------------------|
| Pitch axis | -12° / +12° | 15 deg/s - 150 deg/s ² |
| Roll axis | -30° / +30° | 15 deg/s - 150 deg/s ² |

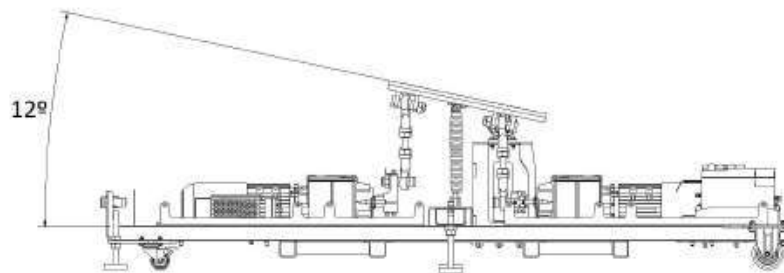


Figure 1: Pitch inclination

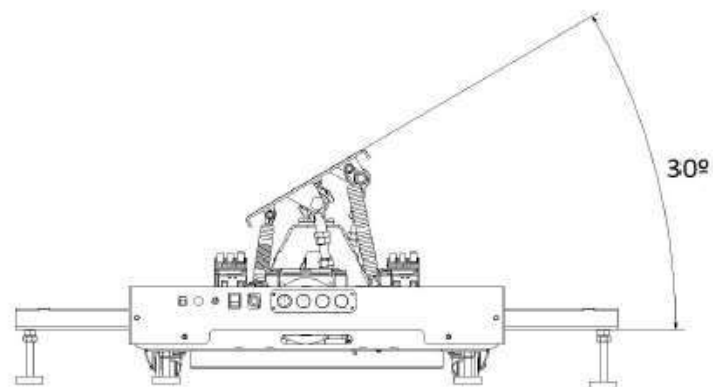


Figure 2: Roll inclination





2.3. PAYLOAD SPECIFICATION.

| | |
|--------------------|----------------------|
| Gross moving load | 350kg |
| CoG height | 0.5m |
| Moments of inertia | 500kg m ² |

2.4. MAIN DIMENSIONS.

| | |
|------------------------|-------|
| Ground circle diameter | 3m |
| Base height | 0.5m |
| System weight | 400kg |

2.5. POWER REQUIREMENTS.

| | |
|-------------------|--|
| Mains power | 1 phase 220-240 VAC +/- 10% - 50/60Hz |
| Power consumption | 2000W (peak) – 500Wh (normal use estimation) |
| System weight | 400kg (including standard motorcycle chasis) |

2.6. DIAGRAMS AND SCHEMAS.

2.6.1. COMMUNICATION DIAGRAM.

The following image shows the *SMKSMB_2DOFMB* communication diagram:

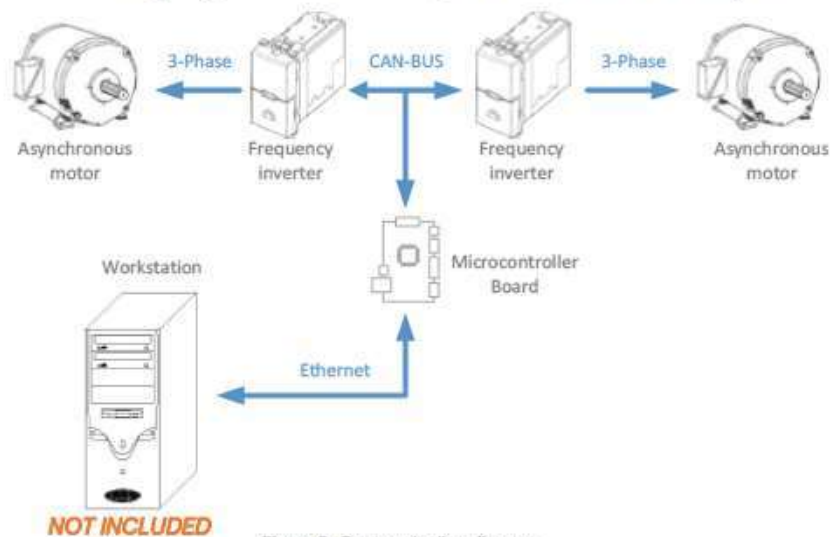


Figure 3: Communication diagram.





2.6.2. GENERAL DIMENSIONS

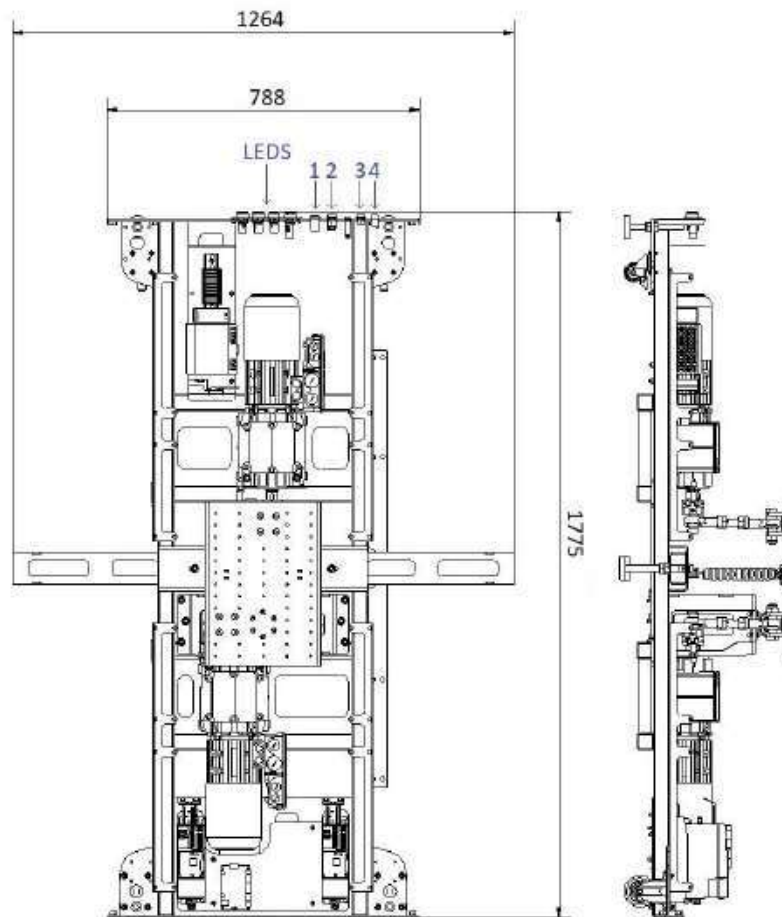


Figure 4: General dimensions.





2.6.3. ELECTRICAL SCHEMA

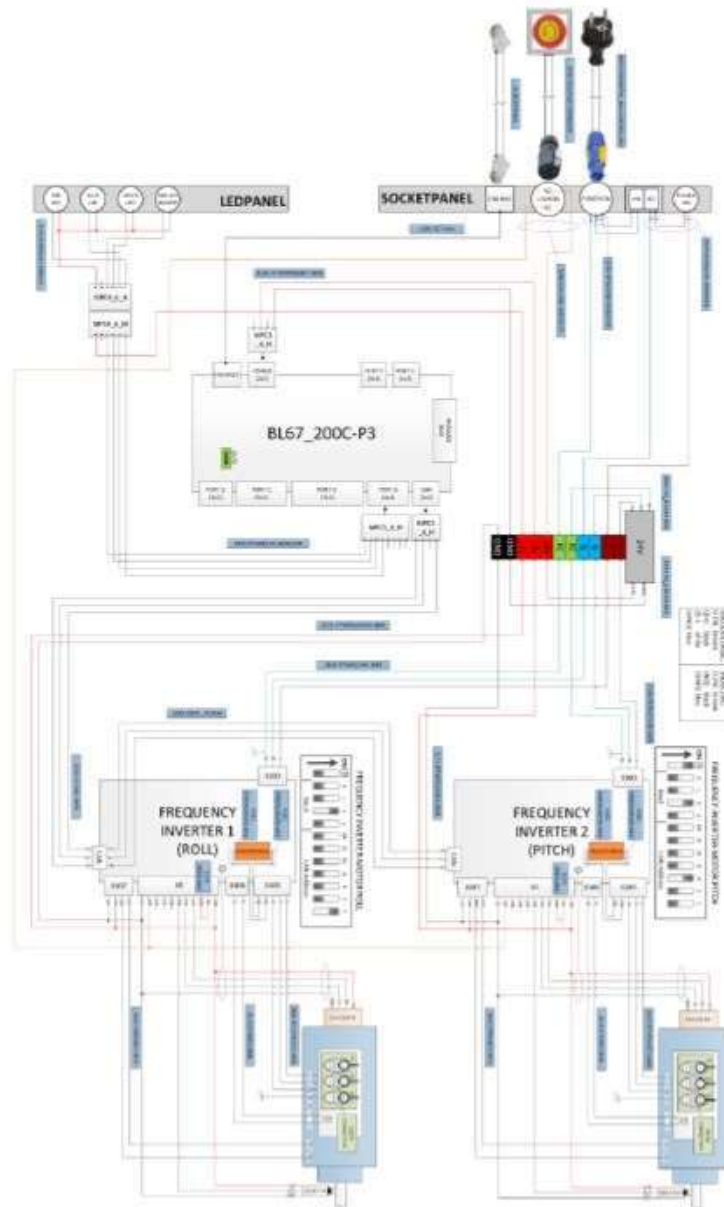


Figure 5: Electrical schema.





2.6.4. MICROCONTROLLER BOARD SPECIFICATIONS.

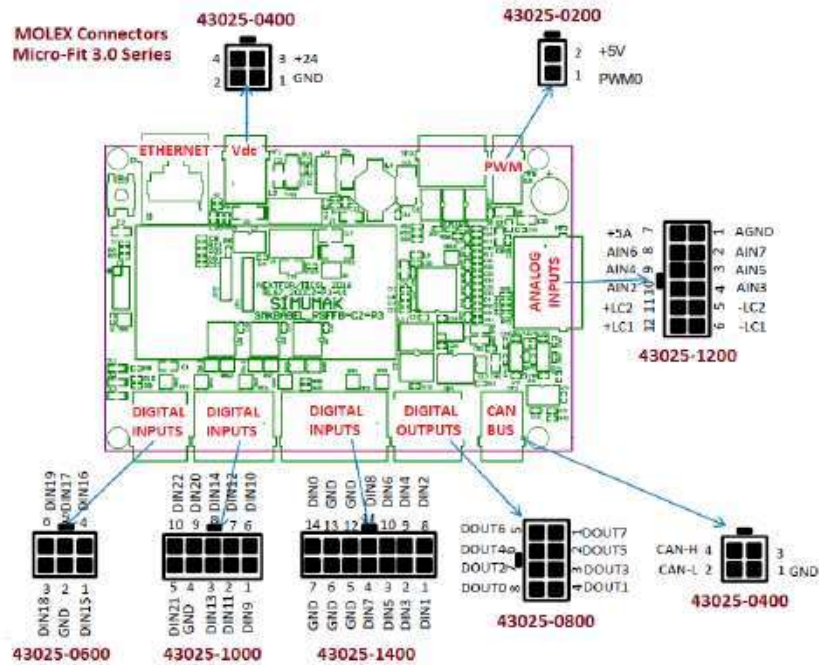


Figure 6: Microcontroller board Rabbit BL67_200C-P3

| | Quantity | Type | Operation range | Pins |
|------------------|----------|--------------------|---|---------------------|
| Input voltage | | | 24VCC | +24/GND |
| Digital inputs | 23 | Sink, Non Isolated | $V_{in(max)} = \pm 36V$. GND=1 (logic) | DIN0-DIN22 |
| Digital outputs | 8 | Sink | $I_{max}=500mA$. $V_{max} = +5V$ | DOU0-DOU7 |
| Analog inputs | 6 | 12 Bits resolution | $V_{in} = 0/+5V$ | AIN0-AIN7 |
| Load cell inputs | 2 | 12 Bits resolution | Range Cell charge output = 0/10mV | AIN0-AIN1 (LC1-LC2) |
| PWM outputs | 1 | Sink output | $I_{max}=500mA$. $V_{max} = +5V$ | PWM0 |

Table 1: Rabbit BL67_200C-P3 specifications.





2.6.5. LED STATUS AND MOTION STATES

Meaning of led indicators:

- ALARM: The motion platform is out of simulation or there is an error. Indicator with light and beep (a sound) warning at the same time.
- ON: The motion platform is on.
- ENGAGED: Correct operation of the motion platform, waiting for an order.
- ERROR: Error in the motion platform. Possible causes: hardware (emergency stop), software or an engine.

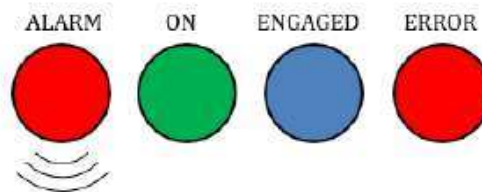


Figure 7: Led indicators.

Depending on the led indicator, the motion platform will be in the following positions:

| | | LED | | | |
|----------------|------------|--------|--------|---------|-------|
| | | ALARM | ON | ENGAGED | ERROR |
| PLATFORM STATE | INITIATING | ■ ■ | | OFF | OFF |
| | DO_NOTHING | ■ ■ | OFF | OFF | OFF |
| | PARKING | ■ ■ | ■ ■ | OFF | OFF |
| | PARKED | OFF | ■■■■■ | OFF | OFF |
| | ENGAGING | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | OFF |
| | ENGAGED | OFF | ■■■■■ | ■■■■■ | OFF |
| | SW_STOPPED | OFF | ■■■■■ | OFF | ■ ■ |
| | HW_STOPPED | OFF | ■■■■■ | OFF | ■ ■ |
| | ERROR | ■ ■ | ■■■■■ | OFF | ■■■■■ |
| | CAN_ERROR | RANDOM | RANDOM | RANDOM | |

Table 2: Platform status according to the status of the led indicators.





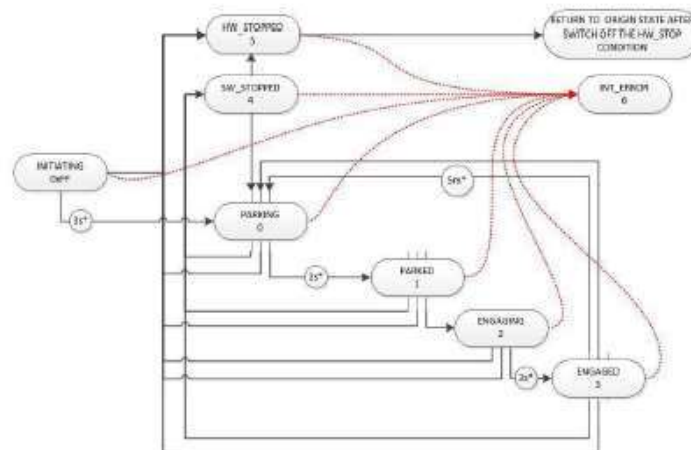
Status of each led indicator:

| | |
|--------|--|
| | 20Hz blinking led (0,05s) – Very high frequency. |
| | 10Hz blinking led (0,1s) –High frequency. |
| | 2Hz blinking led (0,5s) – Medium frequency. |
| | 1Hz blinking led (1s) – Low frequency. |
| | Led on. |
| OFF | Led off. |
| RANDOM | Any state. |

Table 3: Different states of the led indicators.

Possible status of the motion platform:

- INITIATING: Start-up status and homing position of the motion platform.
- DO_NOTHING: Sleep mode.
- PARKING: Searching for the middle position. Once the middle position is reached, the motion platform changes to “parked” position.
- PARKED: Middle position reached, waiting for receiving an activation command.
- ENGAGING: The process between parked status and engaged status where the motion platform searches its middle position after receiving an activation command.
- ENGAGED: Working status. Read and produce commands and orders.
- SW_STOPPED: Shut down status via software.
- HW_STOPPED: Shut down status via hardware (with the emergency stop switch).
- ERROR: Fault or error status. Possible causes: errors in the controller board, frequency converter or engine.
- CAN_ERROR: Error status due to a CAN communication.

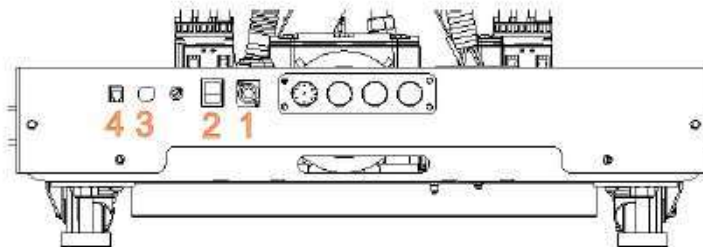




3. OPERATION PROCEDURE.

Turn on, turn off, connexion processes and mode of use of the motion platform.

3.1. START UP PROCEDURE.



For the first start-up of the motion platform, the instructions must be followed:

- 1) Connect the emergency stop switch to connector 3. The emergency stop switch must be off.
The user will turn on in an emergency situation to produce a complete stop of the motion platform.
- 2) Connect the Ethernet cable to connector 4 and then to computer's Ethernet port. Configure the IP interface of the PC to 10.0.0.1 with 255.255.255.0 as mask.
- 3) Connect the power supply cable to connector 1 (image 4) and then to the electricity network.
- 4) Pulse-on in switch 2 (image 4) to ON status.
- 5) The motion platform will switch on and do the autocalibration process. It takes some seconds and after that the motion platform reach the parked status waiting for engaging command.
- 6) The platform is ready for connection with PC at this moment. The IP of the motion platform is 10.0.0.101. Check with PING if connection is ok.
- 7) As the communication between the motion platform and the software is made via UDP Ethernet Sockets, it is important to disable the firewall or to include the motion platform application in the exception list of the firewall or antivirus. UDP ports 1234, 1510, 1511 and 1512 needs to be open and free in the system.
- 8) Connect the USB joystick for be able to control de position of the motion platform. Check that windows recognizes the USB joystick device.
- 9) You can now start working with the motion platform from the pc.





3.2. TESTING AND PLAY PROCEDURE.

For testing purpose it is included an application that let the user to check the right working of the motion platform.

Unzip the software delivered in the pendrive and you will find three folders:

- o source
- o binaries
- o dll

Go to binaries and execute "SMKSMB_2DOF_TESTER.exe". This application is also available as source code in the folder "source". This application is a visual basic application (visual studio 2010) that uses the SMKSMB_2DOF_MB DLL for controlling the motion platform. The name of the DLL is "SMKBABEL_HOSTDRIVER.dll" and it is available at 32 or 64 bits in the "dll" folder. It is a good idea to see how this application works and how it calls the several functions of the DLL for improve the understanding about how to use the motion platform interface.

If the IP of the PC is correctly configured and all the START UP PROCEDURE was made following the instructions, the application will start correctly and shows its main screen.



The application has two main tabs. "Input/Output" tab for interfacing with the inputs and outputs connected to the main board of the SMKSMB_2DOFMB and "Motion platform" tab for controlling the movements of the motion platform.





3.2.2. MOTION PLATFORM TAB

From this tab it is possible to interface with the motion platform. It is useful to check that the motion platform is working perfectly. It is important to connect a Joystick for test the whole functionality, because the joysticks acts as PID for the motion base. It is important to connect the joystick before launch the application.

After launch the application, verify that the joystick was detected, verify that the "Use joystick for control position" option is checked and verify that base speed and lateral / frontal par are not set to 0. Then press ENGAGE button. When the motion platform is ENGAGED it is possible to send positions using the joystick and also to verify how the motion system reacts when any parameter is modified.

It is possible to see the MOTION PLATFORM status in the base bar of the application. (MP Status: ??). For know more about the STATES of the motion platform please read the chapter "2.6.5. Led status and motion states" contained in this manual.

The screenshot shows the 'SMKSMB_2DOFMB_TESTER' application window. It features three main tabs: 'ENGAGE', 'PARK', and 'SW_INHIBIT'. The 'ENGAGE' tab is active, showing 'Motion parameters' with a joystick control and 'Rumble parameters' with sliders for 'Rumble type', 'Rumble frequency', and 'Rumble intensity'. There are 'UPDATE' buttons for both parameter sections. The 'Motion status' section at the bottom shows 'Lateral par' and 'Frontal par' with corresponding status indicators. Three text boxes provide additional context: the first explains the 'Use joystick for control position' option; the second details the 'Lateral' and 'Frontal' parameters; the third describes the 'Rumble' parameters and the 'UPDATE' button's function. A small note at the bottom right says 'Save/Par/Joystick register for each axis.'

ATTENTION: Be careful working with RUMBLE PARAMETERS. High frequency and high intensity rumbling can produce injuries.

For the initial setup of MOTION PARAMETERS there are some variables that can be predefined in SMBabelConfig.ini:

[MOTION_SETTINGS]

BASE_SPEED=0.9

BASE_PAR_FRONTAL=0.5

BASE_PAR_LATERAL=0.5





3.2.3. COMMON ERRORS LAUNCHING THE APPLICATION

If you receive an error when launching the application, here it is an explanation about the causes of that errors. Besides to see the error in the screen it is useful to read the generated LOG file called "SMKBabelLogfile.log".

| Problem | Cause |
|--|--|
| A message appears in the screen and it says "Please, connect a joystick and reboot the application for controlling the motion platform position" | Joystick was not detected. Try with the original joystick provided with the motion system. Check if windows is detecting the joystick. |
| A message appears in the screen and it says "Error connecting with motion platform. Error code -3" | The IP is not correctly configured. Try to make PING between PC and motion platform. Check if IP configuration is correctly set in SMKbabelConfig.ini. The IP of the motion platform it is 10.0.0.101. IP of the PC must be 10.0.0.1 and the mask 255.255.255.0. |
| A message appears in the screen and it says "Error code -2" | That error is produced because socket system is busy. Probably there are 2 instances of application working simultaneously. Close the open instances and try again. If error continues, reboot the PC. |
| A message appears in the screen and it says "Error code -1" | It is a problem with the content of SMKbabelConfig.ini file. Check if all the variables are ok and nothing is corrupt in the content of the file. Get the original file and restore it. |
| Everything seems to be right, but there is no motion in the motion platform. | Check if emergency stop is not pressed. Check if SW_INHIBIT button was not pressed. For rearm the motion system click on ENGAGE. |

3.3. SWITCH OFF PROCEDURE.

Pulse off in switch 2 (image 4) to OFF status of the motion platform.





4. SOFTWARE INTEGRATION.

4.1. BASIC CONCEPTS

If you are Reading this chapter is because you are interested in integrate the motion platform with your application.

The motion platform communicates with any WINDOWS PC using the "SMKBABEL_HOSTDRIVER.dll" DLL (onwards "the DLL"). That DLL was created by SIMUMAK in unmanaged C++ and lets to control the motion platform using socket communication from any windows application. It is possible to invoke the DLL from C# (using a wrapper to call the functions), visual basic, visual c, and any other languages that supports DLL invoking.

The DLL has some methods, that we described in the chapter "4.3. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia." that lets the 3rd party developer to have total control of the motion system.

The motion platform includes on its firmware a basic MOTION CUE system, that lets the developer to work in accelerations and inclinations, sending that parameters to the motion system throw one function created for that purpose. That is useful in most cases in simulation applications, because avoid the developer to worries about the position that must adopt the motion platform at any dynamical situation.

In telecommunications terms, the communication between the motion platform and the PC is made via ETHERNET protocol. The DLL uses UDP sockets for communicate with the motion platform. The number of UDP ports used are 1234, 1510, 1511 and 1512.





The DLL has a method called "start_SMKBabel()" that boots the communications between the DLL and the motion platform. It is the first method you have to invoke if you want to talk with the motion platform. That method uses a configuration file called "SMKBabelConfig.ini" for get the basic information in order to know what is the IP of the motion base and some other configurations (speed, par, and IO map also). If that file does not exist in the path of the DLL or the file is corrupt, the DLL is not going to boot correctly and it will return an error. We will describe this function later, now it is important you know that this file exists and that it is essential for the working of the system.

The motion platform is not only a motion system. Also it can be used as IO system, because the board controlling the motion platform has several analog and digital ports that can be accessed throw some methods declared in the DLL and explained later.

Before to deep in more technical details it is fundamental that continues with "3.2. Testing and play procedure. After understand perfectly the sample, and see how the system works (from the user perspective), please go deeper and read the rest of the SOFTWARE INTEGRATION chapter.

4.2. API OF FUNCTIONS

| Function | Description |
|------------------------------------|--|
| <code>int start_SMKBabel();</code> | <p>This function initiales the communication with the motion platform. This function has to be called at the beginning of the interaction with the DLL, and should to be called only once in the execution of the main application (invoker application).</p> <p>This function reads the SMKBabelConfig.ini configuration file for get the IP of the motion platform, get the initial values for motion platform (par and speed) and also creates the signal mapping for IO interfacing.</p> <p>Returns 1: Ok. System boot.</p> <p>Returns -1: Error reading SMKBabelConfig.ini file.</p> <p>Returns -2: Error reserving the sockets. Probably it is another instance of the application running in background.</p> <p>Returns -3: It was not possible to find the motion platform at the specified IP. Check SMKBabelConfig.ini IP configuration variable. Try to do PING. Check if motion platform is energized.</p> |





| | |
|---|---|
| <pre>float getValue_SMKBabel(LPCSTR signalName);</pre> | <p>This function get the normalized value from one signal defined in the signal mapping.</p> <p>Parameter LPCSTR signalName: The name of the signal, as it is defined in SMKBabelConfig.ini.</p> <p>Return float: Returns the value of that INPUT (analog or digital). From 0 to 1. The lineal relation between the voltage and the value obtained throw this method is defined in SMKBabelConfig.ini file. If returned value is -1 that is because the signal passed as parameter was not found in the signal map of the system (defined in SMKBabelConfig.ini).</p> |
| <pre>bool setValue_SMKBabel(LPCSTR signalName, float value);</pre> | <p>This function sets a value to an output signal.</p> <p>Parameter LPCSTR signalName: The name of the signal, as it is defined in SMKBabelConfig.ini.</p> <p>Parameter float value: The value desired for that signal. 0 to 1.</p> <p>Return bool: true = signal was set. False = signal was not set.</p> |
| <pre>float getAIValueForCalibration_SMKBabel(LPCSTR signalName);</pre> | <p>This functions read the voltage of an analog signal.</p> <p>Parameter: LPCSTR signalName: The name of the signal, as it is defined in SMKBabelConfig.ini.</p> <p>Return float: The voltage read. -1 if the signal was not found in the signal mapping declared in SMKBabelConfig.ini.</p> |
| <pre>void MP_sendCommand(int command);</pre> | <p>This function sends a command to the motion platform. The possible values for "int command" are:</p> <p>1: Engage 0: Parking 3: SW INHIBIT</p> |
| <pre>void MP_updateMotionParameters(0, 0, float baseSpeed, 0, float frontalPar, float lateralPar);</pre> | <p>This function update the speed and the par of the axis of the motion platform.</p> <p>baseSpeed: float from 0 to 1. frontalPar: float from 0 to 1. lateralPar: float from 0 to 1.</p> |
| <pre>void MP_updateDynamicParameters(float frontal_pitch, float lateral_pitch, float lineal_acc_x, float lineal_acc_y,</pre> | <p>This function sends inclination and acceleration information to the motion platform in order to recreate the dynamic sensation.</p> |





| | |
|---|--|
| <code>float lineal_acc_z;</code> | The parameters are from 0 to 1. |
| <code>float MP_getParameter(int parameter);</code> | <p>This function lets the to read internal values of the motion platform.</p> <p>Int parameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> 0=status of the motion platform 3=par_frontal configured 4= par_lateral configured 5=base_speed configured 7=axis1_position 8=axis2_position 9=axis1_par 10=axis2_par 11=axis1_speed 12=axis2_speed |
| <code>void MP_updateRumble(int rumbleMode, float freq, float intensity);</code> | <p>This function updates the rumbling of the motion platform.</p> <p>Parameter rumbleMode: from 0 to 8. Several rumbling types.</p> <p>Parameter freq: rumbling frequency. 1 = low frequency movement. 0.0001 = high frequency movement.</p> <p>Parameter intensity: rumbling intensity. From 0 to 1.</p> <p>ATTENTION: Be careful working with this function. High frequency and high intensity rumbling can produce injuries.</p> |
| <code>bool close_SMKBabel();</code> | This function closes the communication with the motion platform. That function has to be called only once, before to close the main application (the invoker application). |





4.3. SMKBABELCONFIG.INI FILE

SMKBabelConfig.ini file is the configuration file of the DLL. It contains the motion initial configuration values and also the signal mapping for the IO interfacing.

4.4. WORKING WITH THE SAMPLE SOURCE CODE

For better understanding is highly recommended to install and deploy the source code delivered with the motion platform system.

Unzip the software delivered in the pendrive and you will find three folders:

- o source
- o binaries
- o dll

In the source folder you will find a "sample project" that contains the SMK_2DOF_TESTER.exe source code. The code is generated and compiled from Visual Studio 2010. Get VS2010 and open the project in that platform.



Anhang B – Programmcodes

Berechnung Vformatrizen für Lenker und Bewegungsplattform

```

...nique Janssen\source\repos\Plattform\Calculations.h 1
11
12
13 class Calculations
14 {
15 public:
16     float zB = -0.9; //m, position centre of mass rear body and frame
17 private:
18     //Bicycle parameters
19     float w = 1.02; //m, wheel base
20     float c = 0.08; //m, trail
21     float lam = M_PI / 10; //rad, steer axis tilt
22     float rR = 0.3; //m, radius rear wheel
23     float mR = 2.0; //kg, mass rear wheel
24     float IRxx = 0.0603; //kgm^2
25     float IRzz = IRxx; //kgm^2
26     float IRyy = 0.12; //kgm^2
27     float xB = 0.3; //m, position centre of mass rear body and frame
28     float stdmB = 85.0; //kg, mass body and frame according to paper
29     float mB = 0.0; //kg, actual mass body and frame
30     float mBF = 5.0; //kg, mass frame
31     float mBR = 80.0; //kg, mass rider
32     float delmB = 0.0; // Difference from paper values to actual value
33     float stdIBxx = 9.2; //kgm^2
34     float IBxx = 0.0; //kgm^2, new value depending on rider's weight
35     float stdIBxz = 2.4; //kgm^2
36     float IBxz = 0.0; //kgm^2, new value depending on rider's weight
37     float stdIByy = 11.0; //kgm^2
38     float IByy = 0.0; //kgm^2, new value depending on rider's weight
39     float stdIBzz = 2.8; //kgm^2
40     float IBzz = 0.0; //kgm^2, new value depending on rider's weight
41     float xH = 0.9; //m, position centre of mass handlebar and fork
42     float zH = -0.7; //m, position centre of mass handlebar and fork
43     float mH = 4.0; //kg, mass handlebar and fork
44     float IHxx = 0.05892; //kgm^2
45     float IHxz = -0.00756; //kgm^2
46     float IHyy = 0.06; //kgm^2
47     float IHzz = 0.00708; //kgm^2
48     float rF = 0.35; //m, radius front wheel
49     float mF = 3.0; //kg, mass front wheel
50     float IFxx = 0.1405; //kgm^2
51     float IFzz = IFxx; //kgm^2
52     float IFyy = 0.28; //kgm^2
53
54     //Calculation parameters
55     float mT = 0.0; //kg, mass total assembly
56     float xT = 0.0; //m, position centre of mass total assembly
57     float zT = 0.0; //m, position centre of mass total assembly
58     float ITxx = 0.0; //kgm^2
59     float ITxz = 0.0; //kgm^2
60     float ITzz = 0.0; //kgm^2
61     float mA = 0.0; //kg, mass front assembly
62     float xA = 0.0; //m, position centre of mass front assembly
63     float zA = 0.0; //m, position centre of mass front assembly

```

```

...nique Janssen\source\repos\Plattform\Calculations.h 2
64 float IAxx = 0.0; //kgm^2
65 float IAxz = 0.0; //kgm^2
66 float IAzz = 0.0; //kgm^2
67 float uA = 0.0; //m, perpendicular distance due to steer axis tilt ↗
    of front assembly
68 float IAlamlam = 0.0; //kgm^2
69 float IAlamx = 0.0; //kgm^2
70 float IAlamz = 0.0; //kgm^2
71 float u = 0.0; // -, ratio of the mechanical trail
72 float SR = 0.0; //kgm, angular moment rear wheel
73 float SF = 0.0; //kgm, angular moment front wheel
74 float ST = 0.0; //kgm, angular moment of both wheels
75 float SA = 0.0; //kgm, angular moment of front assembly
76 float g = 9.81; //ms^2, gravitational force
77
78
79 public:
80     Calculations();
81     float CalculatePreMatrix();
82
83 };

14 float SteeringForceCalculation::CalculateConfiguration()
15 {
16     cout << "Please enter weight of rider:" << endl;
17     cin >> mBR;
18     cout << "Calculation will be done, please wait." << endl;
19
20     //Calculation for effects by rider weight
21     mB = mBR + mBF;
22     delmB = mB / stdmB;
23     IBxx = stdIBxx * delmB; IBxz = stdIBxz * delmB; IBzz = stdIBzz * ↗
        delmB; IByy = stdIByy * delmB;
24
25     //Calculation for pre-matrixes
26     mT = mR + mB + mH + mF;
27     xT = (xB * mB + xH * mH + w * mF) / mT;
28     zT = (-rR * mR + zB * mB + zH * mH - rF * mF) / mT;
29     ITxx = IRxx + IBxx + IHxx + IFxx + mR * rR * rR + mB * zB * zB + mH ↗
        * zH * zH + mF * rF * rF;
30     ITxz = IBxz + IHxz - mB * xB * zB - mH * xH * zH + mF * w * rF;
31     ITzz = IRzz + IBzz + IHzz + IFzz + mB * xB * xB + mH * xH * xH + mF ↗
        * w * w;
32     mA = mH + mF;
33     xA = (xH * mH + w * mF) / mA;
34     zA = (zH * mH - rF * mF) / mA;
35     IAxx = IHxx + IFxx + mH * (zH - zA) * (zH - zA) + mF * (rF + zA) * ↗
        (rF + zA);
36     IAxz = IHxz - mH * (xH - xA) * (zH - zA) + mF * (w - xA) * (rF + ↗
        zA);
37     IAzz = IHzz + IFzz + mH * (xH - xA) * (xH - xA) + mF * (w - xA) * (w ↗
        - xA);
38     uA = (xA - w - c) * cos(lam) - zA * sin(lam);
39     IAlamlam = mA * uA * uA + IAxx * sin(lam) * sin(lam) + 2 * IAxz * ↗
        sin(lam) * cos(lam) + IAzz * cos(lam) * cos(lam);
40     IAlamx = -mA * uA * zA + IAxx * sin(lam) + IAxz * cos(lam);
41     IAlamz = mA * uA * xA + IAxz * sin(lam) + IAzz * cos(lam);
42     mu = (c / w) * cos(lam);
43     SR = IRyy / rR;
44     SF = IFyy / rF;
45     ST = SR + SF;
46     SA = mA * uA + mu * mT * xT;

```

```

...teeringForceCalculator\SteeringForceCalculation.cpp 2
47
48 //Calculation of pre-matrixes
49 Msigsig = ITxx;
50 Mdelsig = IAlamx + μ * ITxz;
51 Msigdel = IAlamx + μ * ITxz;
52 Mdeldel = IAlamlam + 2 * μ * IAlamz + μ * μ * ITzz;
53 K0sigsig = mT * zT;
54 K0delsig = -1 * SA;
55 K0sigdel = -1 * SA;
56 K0deldel = -1 * SA * sin(lam);
57 K2sigsig = 0;
58 K2delsig = 0;
59 K2sigdel = ((ST - (mT * zT)) / w) * cos(lam);
60 K2deldel = ((SA + (SF * sin(lam))) / w) * cos(lam);
61 C1sigsig = 0;
62 C1delsig = -((μ * ST) + (SF * cos(lam)));
63 C1sigdel = μ * ST + SF * cos(lam) + (ITxz / w) * cos(lam) - μ * mT * zT;
64 C1deldel = (IAlamz / w) * cos(lam) + μ * (SA + (ITzz / w) * cos(lam));
65
66 return Msigsig, Mdelsig, Msigdel, Mdeldel, K0sigsig, K0delsig,
    K0sigdel, K0deldel,
67     K2sigsig, K2delsig, K2sigdel, K2deldel, C1sigsig, C1delsig,
    C1sigdel, C1deldel,
68     mT, zT, ITxx, ITxz, IAlamx, ST, SF, SA;
69
70 }

```

Bewegungsplattform

```

...Code\Code\MotionPlatform\DBikeSimMotionPlatform.cpp 1
428     if (IsModelBasedCalc)
429     {
430
431         PreCalc = std::chrono::high_resolution_clock::now();
432         double delta_time_ms = std::chrono::duration<double,
            std::milli>(PreCalc - t_end).count();
433
434         // Calculation of Steering Input
435         float forwardVelocity = _input.MoSAIC.BikeInstance
            [0].SpeedMeasurement.ForwardVelocity;
436         float steeringAngle = _input.MoSAIC.BikeInstance
            [0].Steering.NormedPosition * 180.0f - 90.0f;
437         steeringAngle = steeringAngle * M_PI / 180.0f;
438         steeringAngle = round(steeringAngle * 100.0) / 100.0;
439         float steeringAngleRate = (steeringAngle -
            SteeringAngleOld) / (delta_time_ms / 1000.0);
440         steeringAngleRate = round(steeringAngleRate * 100.0) /
            100.0;
441         steeringAngleRate = fLimitInRange(steeringAngleRate, 2.25,
            -2.25f);
442         steeringAngleRate *= 0.1f;
443
444         float steeringAngleAcceleration = (steeringAngleRate -
            SteeringAngleVelocityOld) / (delta_time_ms / 1000.0);
445         steeringAngleAcceleration = round(steeringAngleAcceleration *
            100.0) / 100.0;
446         steeringAngleAcceleration = fLimitInRange
            (steeringAngleAcceleration, 25.0f, -25.0f);
447         steeringAngleAcceleration *= 0.01f;
448
449         // Prepare next Cycle
450         SteeringAngleOld = steeringAngle;
451         SteeringAngleVelocityOld = steeringAngleRate;
452
453         // Calculation of Lean Angle Input
454         currentLeanAngle = (fMP_07_axis1Position * 30.0f - 15.0f) *
            -1.0f;
455         currentLeanAngle = currentLeanAngle * M_PI / 180.0f;
456         currentLeanAngle = round(currentLeanAngle * 100.0) / 100.0;
457         //currentLeanAngle = virtualLeanAngle;
458
459
460         float leanAngleRate = (currentLeanAngle - LeanAngleOld) /
            (delta_time_ms / 1000.0);
461         leanAngleRate = round(leanAngleRate * 100.0) / 100.0;
462         leanAngleRate = fLimitInRange(leanAngleRate, 0.25f,
            -0.25f);
463         leanAngleRate *= 0.1f;
464         float leanAngleAcceleration = (leanAngleRate -
            LeanAngleRateOld) / (delta_time_ms / 1000.0);
465         leanAngleAcceleration = round(leanAngleAcceleration *
            100.0) / 100.0;
466         leanAngleAcceleration = fLimitInRange

```

```

...Code\Code\MotionPlatform\DBikeSimMotionPlatform.cpp 2
    (LeanAngleAcceleration, 0.1f, -0.1f);
467     leanAngleAcceleration *= 0.01f;
468
469
470     // Prepare next Cycle
471     LeanAngleOld = currentLeanAngle;
472     LeanAngleRateOld = leanAngleRate;
473
474
475     // Inclination Input
476     float inclination = _input.MoSAIC.BikeInstance
    [0].MotionCueing.MotionPlatform.Inclination;
477
478 #pragma region CalcObject
479
480     /*
481     float leanAngle = CalcObj.CalculateLeanAngle
    (forwardVelocity, currentLeanAngle, steeringAngle,
    steeringAngleRate, steeringAngleAcceleration,
    leanAngleAcceleration);
482     //float leanAngle = CalcObj.CalculateLeanAngle
    (forwardVelocity, 0, steeringAngle, steeringAngleRate,
    steeringAngleAcceleration, 0);
483     leanAngle = leanAngle * 180.0f / M_PI;
484     // calculate Increments
485     virtualLeanAngle = leanAngle;
486     if (virtualLeanAngle > 15.0f) virtualLeanAngle = 15.0f;
487     if (virtualLeanAngle < -15.0f) virtualLeanAngle = -15.0f;
488     */
489
490 #pragma endregion
491
492 #pragma region Unreal
493
494     // calculate Virtual Contact point under Bike
495     if (steeringAngle > 0.05 || steeringAngle < -0.05)
496     {
497         VirtualPoint += forwardVelocity* 0.8f * sin
    (steeringAngle) * 0.6f * (delta_time_ms / 1000.0f);
498     }
499     else {
500
501     }
502     // add Bleeding to compensate integral failure
503     VirtualPoint += (0 - VirtualPoint) * 3.0f *
    (delta_time_ms / 1000.0f);
504
505     if (VirtualPoint > 0.4f) VirtualPoint = 0.4f;
506     if (VirtualPoint < -0.4f) VirtualPoint = -0.4f;
507
508     // calc Lean Angle between Seat and Virutal Point
509     float leanAngle = atan(VirtualPoint / (-CalcObj.zB));
510     leanAngle = leanAngle * 180.0f / M_PI;

```

```

...Code\Code\MotionPlatform\DBikeSimMotionPlatform.cpp 3
511     if (leanAngle > 15.0f) leanAngle = 15.0f;
512     if (leanAngle < -15.0f) leanAngle = -15.0f;
513
514
515
516 #pragma endregion
517
518
519     float lateral = scale(30.0f, -30.0f, 1.0f, 0.0f,
                           leanAngle);
520     //printf("Lateral Scaled: %.2f ", lateral);
521     /*
522     if (abs(LateralOld - lateral) > MaxLateralChange)
523     {
524         printf("Limitation triggered: Lateral Change too high
525                Old: %.2f -> New: %.2f Diff(abs): %.2f Max: %.2f
526                \n", LateralOld, lateral, abs(LateralOld - lateral),
527                MaxLateralChange);
528         if (LateralOld - lateral < 0.0f)
529         {
530             lateral = LateralOld + MaxLateralChange;
531         }
532         else
533         {
534             lateral = LateralOld - MaxLateralChange;
535         }
536     }
537     printf("Lateral limited: %.2f ", lateral);
538     */
539     //printf("Calced_LA = %.2f F_Velo = %.2fm/s Current_LA =
540            %.2f rad LA_Rate = %.2f rad/s LA_Acc = %.2f rad/s^
541            ST_Angle = %.2f rad ST_Velo = %.3f rad/s ST_Acc = %.3f rad/
542            s^2 \r"
543            , leanAngle, forwardVelocity, currentLeanAngle,
544            leanAngleRate, leanAngleAcceleration, steeringAngle,
545            steeringAngleRate, steeringAngleAcceleration);
546
547     if (!IsVelocityInRange && forwardVelocity > 2.5f)
548     {
549         IsVelocityInRange = true;
550     }
551     if (IsVelocityInRange && forwardVelocity < 2.0f)
552     {
553         IsVelocityInRange = false;
554     }
555
556     if (!IsVelocityInRange && hFlag_IsVelocityInRange)
557     {
558         targetPosition = 1.0f - fMP_07_axis1Position;
559     }
560
561     hFlag_IsVelocityInRange = IsVelocityInRange;

```

```
...Code\Code\MotionPlatform\DBikeSimMotionPlatform.cpp 4
555
556     if (!IsVelocityInRange)
557     {
558         if (isInRange(targetPosition, 0.5f, 0.03f))
559         {
560             targetPosition = 0.5f;
561         }
562         else
563         {
564
565             if ((targetPosition) > 0.5f)
566             {
567                 targetPosition = targetPosition -
PlatformSpeedForMiddle * delta_time_ms / 1000.0f;
targetPosition < 0.5f ? 0.5f : targetPosition;
568             }
569             else
570             {
571                 targetPosition = targetPosition +
PlatformSpeedForMiddle * delta_time_ms / 1000.0f;
targetPosition > 0.5f ? 0.5f : targetPosition;
572             }
573
574             }
575
576         }
577         lateral = targetPosition;
578         printf("Current / Target Position: %.2f / %.2f
DeltaTime: %.2f \n", fMP_07_axis1Position,
targetPosition, delta_time_ms);
579     }
580
581
582
583     lateral = fLimitInRange(1.0f - lateral, 0.6, 0.4);
584     _output.MoSAIC.BikeInstance[0].MotionPlatform.LeanAngle =
lateral;
585     MP_updateDynamicParameters(0.5f, lateral, 0.5f, 0.5f,
0.5f);
586     //printf("Virtual Point: %.2f leanAngle: %.2f
\r", VirtualPoint, leanAngle);
587     LateralOld = lateral;
588
589     //MP_updateMotionParameters(0, 0, 0.2, 0, 1.0f, 1.0f);
590
591     // prepare next Cycle
592     t_end = std::chrono::high_resolution_clock::now();
593
594
595
596
597 }
598 else
```

Lenker

```
...992].zip\BikeSimSteering\src\COD_Lexium32AWheel.cpp 1
764     if (UseOldCode) {
765         float velocity = _pInput->MoSAIC.BikeInstance
766             [0].MotionCueing.Steering.Torque;
767         //velocity = 0.0f;
768
769         // Torque Calc Conf
770         double parameter1 = 0.5;
771         double parameter2 = 5.1;
772         double MaxSpeedForSlowEffect = 0.0;
773
774         simulatedTorqueBike = -_SWCHelper.calcSteeringTorqueSimulation(
775             velocity, // Forward Velocity
776             (_normedPosi * 180.0f) - 90.0f, // Steering Angle
777             convertedVelocity, // RPS
778             parameter1,
779             parameter2,
780             MaxSpeedForSlowEffect,
781             time);
782
783         // Damping Conf
784         _minDamping = 0.0;
785         _normalDamping = 0.2; //0.168 // 0.268
786         _maxDamping = 0.4; //0.336 // 0.672
787         double _normedDamingFactor = 0.5;
788
789         torqueDamping = -_SWCHelper.calcDampingTorque(
790             convertedVelocity,
791             _normedDamingFactor,
792             _minDamping,
793             _normalDamping,
794             _maxDamping);
795         // Sum up Forces
796         forceDummy = (simulatedTorqueBike + torqueDamping) * _maxForce;
797     }
798     else
799     {
800         // BikeEval2 Code
801
802         // read dominion inputs
803         double LeanAngle = _pInput->MoSAIC.BikeInstance
804             [0].MotionCueing.Steering.LeanAngle;
805
806         // @TODO: Check if in m/s
807         double ForwardVelocity = _pInput->MoSAIC.BikeInstance
808             [0].MotionCueing.Steering.ForwardVelocity;
809
810         // read app inputs
811         // @TODO: check normed position on bike
812         if (!IsValidRange && ForwardVelocity > 2.5f) IsValidRange =
813             true;
814         if (IsValidRange && ForwardVelocity < 2.0f) IsValidRange =
815             false;
816     }
817 }
```

```
...992].zip\BikeSimSteering\src\COD_Lexium32AWheel.cpp 2
812
813     if (IsValidRange)
814     {
815         double MAX_SteeringAngle = 90.0 * M_PI / 180.0;    //  ↗
816         [rad ]
817         double MIN_SteeringAngle = -90.0 * M_PI / 180.0;   //  ↗
818         [rad ]
819         double SteeringAngle = (_normedPosi * (MAX_SteeringAngle -
820         MIN_SteeringAngle)) + MIN_SteeringAngle;
821
822         double SteeringAngleVelocity = convertedVelocity * 2.0f *  ↗
823         M_PI;
824         //(SteeringAngleOld - SteeringAngle) / deltaTime;
825         double SteeringAngleAcceleration_Angle =  ↗
826         (SteeringAngleVelocityOld - SteeringAngleVelocity) /  ↗
827         deltaTime;
828
829         double TranslationIncsToRad = (MAX_SteeringAngle -  ↗
830         MIN_SteeringAngle) / (_maxIncrementeAbs -  ↗
831         _minIncrementeAbs);
832         double SteeringAngleAcceleration_Incs = convertedVelocity *  ↗
833         TranslationIncsToRad; // [incs / sec] * [grad / incs]
834
835         // convert to rad
836         LeanAngle = LeanAngle * M_PI / 180.0;
837
838         // calculate values
839         double LeanAngleVelocity = (LeanAngleOld - LeanAngle) /  ↗
840         deltaTime;
841
842         double LeanAngleAcceleration = (LeanAngleVelocityOld -  ↗
843         LeanAngleVelocity) / deltaTime;
844
845         // save old value for next cycle
846         LeanAngleOld = LeanAngle;
847         LeanAngleVelocityOld = LeanAngleVelocity;
848         SteeringAngleOld = SteeringAngle;
849         SteeringAngleVelocityOld = SteeringAngleVelocity;
850
851         forceDummy = CalculatorObject.CalculateLoad  ↗
852         (ForwardVelocity, SteeringAngle, SteeringAngleVelocity,  ↗
853         SteeringAngleAcceleration_Angle, LeanAngle,  ↗
854         LeanAngleVelocity, LeanAngleAcceleration);
855
856         float forceDummy_temp = CalculatorObject.CalculateLoad  ↗
857         (ForwardVelocity, SteeringAngle, SteeringAngleVelocity,  ↗
858         SteeringAngleAcceleration_Incs, LeanAngle,  ↗
859         LeanAngleVelocity, LeanAngleAcceleration);
```

```

...992].zip\BikeSimSteering\src\COD_Lexium32AWheel.cpp 3
850
851     t_end = std::chrono::high_resolution_clock::now();
852     printf("CalcForce: FVel: %f, StAng: %f, StAngVel: %f,
           StAngAcc: %f, LeanAng: %f, LeanAngVel: %f, LeanAngAcc: %
           f, deltaTime: %f \n",
853           ForwardVelocity, SteeringAngle, SteeringAngleVelocity,
           SteeringAngleAcceleration_Angle, LeanAngle,
           LeanAngleVelocity, LeanAngleAcceleration, deltaTime);
854
855     double factor = _pInput->MoSAIC.BikeInstance
           [0].MotionCueing.Steering.Torque;
856     if (factor < 0) factor = 0;
857     if (factor > 100.0) factor = 100.0;
858
859     forceDummy *= factor;
860 }
861 else
862 {
863
864     // Torque Calc Conf
865     double parameter1 = 0.5;
866     double parameter2 = 5.1;
867     double MaxSpeedForSlowEffect = 0.0;
868
869     simulatedTorqueBike = -
           _SWCHelper.calcSteeringTorqueSimulation(
870         ForwardVelocity, // Forward Velocity
871         (_normedPosi * 180.0f) - 90.0f, // Steering Angle
872         convertedVelocity, // RPS
873         parameter1,
874         parameter2,
875         MaxSpeedForSlowEffect,
876         time);
877
878     // Damping Conf
879     _minDamping = 0.0; //0.0
880     _normalDamping = 0.2; //0.2 //0.168 // 0.268
881     _maxDamping = 0.4; //0.4 //0.336 // 0.672
882     double _normedDamingFactor = 0.1; // 0.5
883
884     torqueDamping = -_SWCHelper.calcDampingTorque(
885         convertedVelocity,
886         _normedDamingFactor,
887         _minDamping,
888         _normalDamping,
889         _maxDamping);
890     // Sum up Forces
891     forceDummy = (simulatedTorqueBike + torqueDamping) *
           _maxForce;
892 }
893 }
894
895 ForceFeedbackAverageBuffer[ForceFeedbackAverage_Index] =

```

```
...992].zip\BikeSimSteering\src\COD_Lexium32AWheel.cpp 4
    forceDummy;
896 ForceFeedbackAverage_Index = (ForceFeedbackAverage_Index + 1) % 7
    AVERAGE_COUNT;
897
898 if (IsInvalidRange) {
899     forceDummy = getAverageForce();
900 }
901
902 if (forceDummy > _maxForce) forceDummy = _maxForce;
903 if (forceDummy < -_maxForce) forceDummy = -_maxForce;
904
```

Anhang C – Fragebögen

Vor dem Versuch

Druckansicht base (bikeeval2) 23.09.2022, 15:35

<https://fs.dlr.de/survey/bikeeval2/?s2preview=Hun7VzxQai2qFirL7Kga...>

bikeeval2 → base

23.09.2022, 15:35

Seite 01

VP

Diese Seite ist vom Versuchsleitenden auszufüllen.

Welche Nummer wurde dem Probanden zugeordnet?

Seite 02

DG1

Zu Beginn dieser Studie bitten wir Sie um demographische Angaben zu Ihrer Person.

Tragen Sie im Moment eine Sehhilfe?

keine Sehhilfe nötig

Brille

Kontaktlinsen

Sonstiges, und zwar

1 von 4

23.09.2022, 15:36

Wie alt sind Sie (in Jahren)?

 Jahre

Welches Geschlecht haben Sie?

weiblich

männlich

divers

Besitzen Sie einen Führerschein?

ja

nein

Wenn ja, seit wann besitzen Sie Ihren Führerschein?

 (Jahr des Erwerbs)

Wenn ja, welche Klassen beinhaltet Ihr Führerschein?

Pkw

Motorrad

Lkw

Sonstiges (z.B. Fahrgastbeförderung)

Wie oft sind Sie im letzten Jahr im Schnitt...

| | gar nicht | einmal im Jahr | einmal pro Halbjahr | einmal pro Vierteljahr | einmal pro Monat | einmal pro Woche | jeden (Werk-)Tag |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| selbst Auto gefahren? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| mit dem Fahrrad gefahren? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Wie viele Kilometer fahren Sie durchschnittlich im Monat mit dem...

Pkw km

Fahrrad km

Seit wie vielen Jahren fahren Sie Fahrrad?

Jahr/e

Mit welcher Art von Fahrrad fahren Sie die meiste Zeit über?

Mountainbike

Rennrad

Alltagsfahrrad/Trekkingfahrrad

BMX

Sonstiges:

In welcher Umgebung fahren Sie die meiste Zeit über Fahrrad?

Mehrfachauswahl möglich

Waldweg/Feldweg

Stadtverkehr/in der Stadt

In ländlichen Gebieten

Downhill

Sonstiges:

Wie häufig haben Sie bisher eine Virtual-Reality-Brille benutzt?

- Gar nicht
- Einmal
- Zwei bis fünf Mal
- Sechs bis zehn Mal
- Mehr als zehn Mal

Wie häufig haben Sie bisher einen Fahrradsimulator benutzt?

- Gar nicht
- Einmal
- Zwei bis fünf Mal
- Sechs bis zehn Mal
- Mehr als zehn Mal

Wie sehr leiden Sie unter Reisekrankheit?

Reise- oder Bewegungskrankheit, fachsprachlich auch Kinetose, nennt man Zustände mit körperlichen Reaktionen wie Blässe, Schwindel, Kopfschmerz, Übelkeit und Erbrechen, die durch ungewohnte passive Bewegungen, etwa in einem Verkehrsmittel, ausgelöst werden können (z.B. Übelkeit infolge von Lesen während einer Auto- oder Busfahrt).

- Sehr
- Mittel
- Leicht
- Gar nicht

Vielen Dank!

Ihre Antworten wurden gespeichert, Sie können das Browser-Fenster nun schließen.

Nach jedem Szenario

Druckansicht base (nachjedemszenario) 26.09.2022, 13:50

<https://ts.dlr.de/survey/nachjedemszenario/?s2preview=RFmfq9X87Cb..>

nachjedemszenario → base

26.09.2022, 13:50

Seite 01

VP

Diese Seite ist vom Versuchsleitenden auszufüllen.

Welche Nummer wurde dem Probanden zugeordnet?

Welche/s Fahrprofil/Simulationsversion fährt die Versuchsperson gerade?

Alt

Neu

1 von 7

26.09.2022, 13:50

Diese Seite ist vom Versuchsleitenden auszufüllen.

Welches Szenario fährt die Versuchsperson?

- 1a
- 1b
- 1c
- 1d
- 2

Frage wird Versuchsperson in der VR-Brille angezeigt. VP äußert Antwort mündlich.

Antwort der VP bitte notieren.

1. Bitte geben Sie an ob Sie unter einem der folgenden Symptome leiden.

- 1. Unwohlsein
 - 2. Kaum spürbares Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen
 - 3. Leichtes Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen
 - 4. Deutliches Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen
 - 5. Starkes Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen
 - 6. Leichte Übelkeit
 - 7. Deutliche Übelkeit
 - 8. Starke Übelkeit
 - 9. Übelkeit mit (beinahe) Würgen
 - 10. Sich übergeben müssen
-
- 0. Keine Probleme

Diese Seite ist vom Versuchsleitenden auszufüllen.

Welches Szenario fährt die Versuchsperson?

- 1a
- 1b
- 1c
- 1d
- 2

Frage wird Versuchsperson in der VR-Brille angezeigt. VP äußert Antwort mündlich.
Antwort der VP bitte notieren.

2. Bitte geben Sie an ob Sie unter einem der folgenden Symptome leiden.

- 1. Unwohlsein
 - 2. Kaum spürbares Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen
 - 3. Leichtes Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen
 - 4. Deutliches Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen
 - 5. Starkes Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen
 - 6. Leichte Übelkeit
 - 7. Deutliche Übelkeit
 - 8. Starke Übelkeit
 - 9. Übelkeit mit (beinahe) Würgen
 - 10. Sich übergeben müssen
-
- 0. Keine Probleme

Diese Seite ist vom Versuchsleitenden auszufüllen.

Welches Szenario fährt die Versuchsperson?

- 1a
- 1b
- 1c
- 1d
- 2

Frage wird Versuchsperson in der VR-Brille angezeigt. VP äußert Antwort mündlich.

Antwort der VP bitte notieren.

3. Bitte geben Sie an ob Sie unter einem der folgenden Symptome leiden.

- 1. Unwohlsein
 - 2. Kaum spürbares Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen
 - 3. Leichtes Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen
 - 4. Deutliches Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen
 - 5. Starkes Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen
 - 6. Leichte Übelkeit
 - 7. Deutliche Übelkeit
 - 8. Starke Übelkeit
 - 9. Übelkeit mit (beinahe) Würgen
 - 10. Sich übergeben müssen
-
- 0. Keine Probleme

Diese Seite ist vom Versuchsleitenden auszufüllen.

Welches Szenario fährt die Versuchsperson?

- 1a
- 1b
- 1c
- 1d
- 2

Frage wird Versuchsperson in der VR-Brille angezeigt. VP äußert Antwort mündlich.
Antwort der VP bitte notieren.

4. Bitte geben Sie an ob Sie unter einem der folgenden Symptome leiden.

- 1. Unwohlsein
 - 2. Kaum spürbares Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen
 - 3. Leichtes Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen
 - 4. Deutliches Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen
 - 5. Starkes Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen
 - 6. Leichte Übelkeit
 - 7. Deutliche Übelkeit
 - 8. Starke Übelkeit
 - 9. Übelkeit mit (beinahe) Würgen
 - 10. Sich übergeben müssen
-
- 0. Keine Probleme

Diese Seite ist vom Versuchsleitenden auszufüllen.

Welches Szenario fährt die Versuchsperson?

- 1a
- 1b
- 1c
- 1d
- 2

Frage wird Versuchsperson in der VR-Brille angezeigt. VP äußert Antwort mündlich.

Antwort der VP bitte notieren.

5. Bitte geben Sie an ob Sie unter einem der folgenden Symptome leiden.

- 1. Unwohlsein
- 2. Kaum spürbares Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen
- 3. Leichtes Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen
- 4. Deutliches Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen
- 5. Starkes Drücken oder unangenehmes Gefühl im Kopf, Hitzewallungen, Kopfschmerzen, Schwitzen
- 6. Leichte Übelkeit
- 7. Deutliche Übelkeit
- 8. Starke Übelkeit
- 9. Übelkeit mit (beinahe) Würgen
- 10. Sich übergeben müssen

- 0. Keine Probleme

Druckansicht base (nachjedemscenario) 26.09.2022, 13:50

<https://ts.dlr.de/survey/nachjedemscenario/?s2preview=RFmfq9X87Cb...>

Letzte Seite

Vielen Dank!

Ihre Antworten wurden gespeichert, Sie können das Browser-Fenster nun schließen.

Institut für Verkehrssystemtechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – 2022

Nach jedem Fahrprofil

Druckansicht base (bikeeval2blockfahrprofil) 23.09.2022, 09:31

<https://ts.dlr.de/survey/bikeeval2blockfahrprofil/?s2preview=Cqnc1PKxu...>

bikeeval2blockfahrprofil → base

23.09.2022, 09:31

Seite 01

Die Fragen auf dieser Seite werden vom Versuchsleiter ausgefüllt!

Welche Nummer wurde der Versuchsperson zugeordnet?

Welche/s Fahrprofil/Simulationsversion fährt die Versuchsperson?

- Alt
- Neu

1 von 10

23.09.2022, 09:31

1. Bitte kreuzen Sie an, ob und gegebenenfalls wie stark die folgenden Symptome auf Ihren Zustand zutreffen.

| | Gar Nicht | Leicht | Mittel | Schwer |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | | |
| Allgemeines Unwohlsein | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Erschöpfung | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Kopfschmerzen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Gereizte Augen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Probleme scharf zu sehen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Erhöhter Speichelfluss | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Schwitzen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Übelkeit | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Konzentrationschwierigkeiten | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Kopfdrücken | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Verschwommener Blick | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Benommenheit (mit offenen Augen) | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Benommenheit (mit geschlossenen Augen) | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Schwindel | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Flaues Gefühl im Magen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Aufstoßen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

2. Bitte beurteilen Sie jetzt den Fahrradsimulator. Lesen Sie hierfür aufmerksam jedes Wortpaar und machen Sie jeweils ein Kreuz pro Zeile.



| | | | | | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| nützlich | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | nutzlos |
| angenehm | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | unangenehm |
| schlecht | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | gut |
| nett | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | nervig |
| effizient | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | unnötig |
| ärgerlich | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | erfreulich |
| hilfreich | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | wertlos |
| nicht wünschenswert | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | wünschenswert |
| aktivierend | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | einschläfernd |

Anleitung

Beantworten Sie die Fragen indem Sie das entsprechende Feld der 7-Punkte-Skala ankreuzen. Bitte berücksichtigen Sie bei Ihren Antworten die gesamte Skala, da die Zwischenstufen zutreffen können. Beantworten Sie die Fragen unabhängig voneinander in der Reihenfolge, in der sie erscheinen. Überspringen Sie keine Fragen und kehren Sie nicht zu einer vorherigen Frage zurück, um Ihre Antwort zu ändern.

| | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Gar Nicht | | | | Etwas | | | | Vollständig |
| Wie sehr konnten Sie die Ereignisse kontrollieren? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

| | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Reagiert nicht | | | | Reagiert moderat | | | | Reagiert sehr gut |
| Wie reagierte die Umgebung auf Aktionen, die Sie initiiert (oder durchgeführt) haben? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

| | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Extrem künstlich | | | | An der Grenze | | | | Ganz natürlich |
| Wie natürlich erschienen Ihnen die Interaktionen mit der Umgebung? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

| | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Überhaupt nicht | | | | Etwas | | | | Vollständig |
| Wie sehr fühlten Sie sich durch die visuellen Aspekte der Umgebung einbezogen? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

| | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Sehr künstlich | | | | An der Grenze | | | | Ganz natürlich |
| Wie natürlich waren die Mechanismen, mit denen Sie sich durch die Umgebung bewegen konnten? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

| | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Überhaupt nicht | | | | Moderat überzeugend | | | | Sehr überzeugend |
| Wie überzeugend war Ihr Gefühl, dass sich Objekte durch den Raum bewegen? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

| | Keine Übereinstimmung | | Moderate Übereinstimmung | | Starke Übereinstimmung |
|--|--------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Wie sehr stimmen Ihre Erfahrungen in der virtuellen Umgebung mit Ihren Erfahrungen in der realen Welt überein? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| | Gar nicht | | Etwas | | Vollständig |
| Konnten Sie vorhersehen, was als Reaktion auf die von Ihnen durchgeführten Aktionen als nächstes passieren würde? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| | Überhaupt nicht | | Etwas | | Vollständig |
| Wie gut waren Sie in der Lage, aufgrund Ihrer visuellen Wahrnehmung die Umgebung zu erfassen oder etwas zu finden? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| | Nicht überzeugend | | Moderat überzeugend | | Sehr überzeugend |
| Wie überzeugend war Ihr Gefühl, sich in der virtuellen Umgebung zu bewegen? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| | Überhaupt nicht | | Ziemlich genau | | Sehr genau |
| Wie genau konnten Sie die Objekte untersuchen? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| | Überhaupt nicht | | Etwas | | Ausführlich |
| Wie gut konnten Sie Objekte aus verschiedenen Blickwinkeln untersuchen? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Nicht vollständig Etwas hineingezogen Vollständig vertieft

Wie sehr waren Sie in das Geschehen in der virtuellen Welt hineingezogen?

○ ○ ○ ○ ○ ○ ○

Keine Verzögerungen Leichte Verzögerungen Starke Verzögerungen

Wie groß war die Verzögerung zwischen Ihren Handlungen und den erwarteten Folgen?

○ ○ ○ ○ ○ ○ ○

Überhaupt nicht Langsam In weniger als einer Minute

Wie schnell haben Sie sich an die Erfahrung mit der virtuellen Umgebung gewöhnt?

○ ○ ○ ○ ○ ○ ○

Nicht geschickt Geschickt Sehr geschickt

Wie geschickt fühlten Sie sich am Ende der Sitzung, um sich in der virtuellen Umgebung zu bewegen und mit ihr zu interagieren?

○ ○ ○ ○ ○ ○ ○

Überhaupt nicht Etwas abgelenkt Hat mich von der Aufgabe abgehalten

Inwieweit hat die Qualität der visuellen Darstellung Sie bei der Ausführung der zugewiesenen Aufgaben oder erforderlichen Aktivitäten beeinträchtigt oder abgelenkt?

○ ○ ○ ○ ○ ○ ○

Überhaupt nicht Etwas beeinträchtigt Stark beeinträchtigt

Wie sehr hat die Hardware die Ausführung der zugewiesenen Aufgaben oder andere Aktivitäten beeinträchtigt?

○ ○ ○ ○ ○ ○ ○

| | Überhaupt nicht | | | Etwas | | | Vollständig |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Wie gut konnten Sie sich auf die zugewiesenen Aufgaben oder erforderlichen Aktivitäten konzentrieren und nicht auf die Mechanismen, die zur Ausführung dieser Aufgaben oder Aktivitäten verwendet wurden? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Seite 08

| | Überhaupt nicht | | | Etwas | | | Vollständig |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Wie sehr haben Sie die hörbaren Aspekte der Umgebung einbezogen? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

| | Überhaupt nicht | | | Etwas | | | Vollständig |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Wie gut konnten Sie Geräusche identifizieren? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

| | Überhaupt nicht | | | Etwas | | | Vollständig |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Wie gut konnten Sie Geräusche lokalisieren? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

| | Überhaupt nicht | | | Etwas | | | Vollständig |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Wie gut konnten Sie die virtuelle Umgebung aktiv durch Berührung erkunden oder durchsuchen? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

| | Überhaupt nicht | | | Etwas | | | Stark |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Wie gut konnten Sie Objekte in der virtuellen Umgebung bewegen oder manipulieren? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Längs- und Querdynamik

Die nachfolgenden Fragen beschäftigen sich mit der Längsdynamik (Beschleunigen, Bremsen, Fahrgeschwindigkeit, Fahrtwind) und Querdynamik (Lenken, Lehnen) des Fahrradsimulators.

Bitte beantworten Sie jede Frage indem Sie das entsprechende Feld der 7-Punkte Skala auswählen.

Wie realistisch erschien Ihnen die virtuelle Beschleunigung?

| | | | | | | |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Gar nicht realistisch | | | Etwas realistisch | | | Vollkommen realistisch |

Wie sehr glich die virtuelle Fahrgeschwindigkeit der Fahrgeschwindigkeit in der Realität?

| | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Überhaupt nicht | | | Etwas | | | Vollständig |

Empfanden Sie die Stärke des Bremsvorgangs angemessen und griffig?

| | | | | | | |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Gar nicht angemessen | | | Moderat angemessen | | | Vollkommen angemessen |

Empfanden Sie den Fahrtwind passend zur Fahrgeschwindigkeit?

| | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Gar nicht passend | | | Etwas passend | | | Vollkommen passend |

Das Bremsen ermöglichte es mir, das Fahrrad am gewünschten Ort zum Stehen zu bringen.

| | | | | | | |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Trifft gar nicht zu | | | Trifft etwas zu | | | Trifft völlig zu |

Der auftretende Lenkwiderstand fühlte sich realistisch an.

Trifft gar nicht zu Trifft etwas zu Trifft völlig zu

Wie realistisch erschien Ihnen das Hineinlehnen während der Fahrt / Ihrer Fahrmanöver?

Gar nicht realistisch Etwas realistisch Vollkommen realistisch

Wie empfanden Sie das Lehnverhalten bei längeren Kurvenfahrten?

Gar nicht angemessen Moderat angemessen Vollkommen angemessen

Wie empfanden Sie das Lenken bei wechselnden Fahrmanövern (wechselnde Links- und Rechtskurven)

Gar nicht angemessen Moderat angemessen Vollkommen angemessen

Ich konnte das Fahrrad zu jeder Zeit durch Lehnen und Lenken kontrollieren / in die beabsichtigte Richtung steuern.

Trifft gar nicht zu Trifft etwas zu Trifft völlig zu

Welche Aspekte des Fahrradsimulators fanden sie besonders realistisch?

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Wir möchten uns ganz herzlich für Ihre Mithilfe bedanken.

Ihre Antworten wurden gespeichert, Sie können das Browser-Fenster nun schließen.

Abschlussfragebogen

Druckansicht base (abschlussbogen) 16.09.2022, 12:45

<https://ts.dlr.de/survey/abschlussbogen/?s2preview=inTEXSXP2QXW...>

abschlussbogen → base

16.09.2022, 12:45

Seite 01

VP

Diese Seite ist vom Versuchsleitenden auszufüllen.

Welche Nummer wurde dem Probanden zugeordnet?

Reihenfolge der Fahrprofile

Alt – Neu

Neu – Alt

1 von 3

16.09.2022, 12:45

Wie realistisch war die Simulationsumgebung?

Gar nicht realistisch Vollkommen realistisch

Bei welchem Durchgang empfanden Sie das Fahrerlebnis realitätsgetreuer?

Hierbei sind ausschließlich die Fahreigenschaften des Fahrradsimulators gemeint und nicht die Virtual-Reality-Umgebung.

| | Teil 1 | Eher Teil 1 | Beide waren gleich | Eher Teil 2 | Teil 2 |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Fahrtwind | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Bremsen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Beschleunigen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Lenken | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Lehnen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Fahrgeschwindigkeit | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Bitte vergleichen Sie nun Ihr Fahrgefühl im ersten und zweiten Teil dieser Studie. Welcher Teil kommt Ihrer Meinung nach dem echten Fahrgefühl näher?

Teil 1 eher Teil 1 beide waren gleich eher Teil 2 Teil 2

Druckansicht base (abschlussbogen) 16.09.2022, 12:45

<https://ts.dlr.de/survey/abschlussbogen/?s2preview=inTEXSXP2QXW..>

Seite 03

[Feedback](#)

Was hat Ihnen am Fahrradsimulator und der Virtual-Reality-Umgebung gut gefallen?

Welche Aspekte könnten verbessert werden?

Letzte Seite

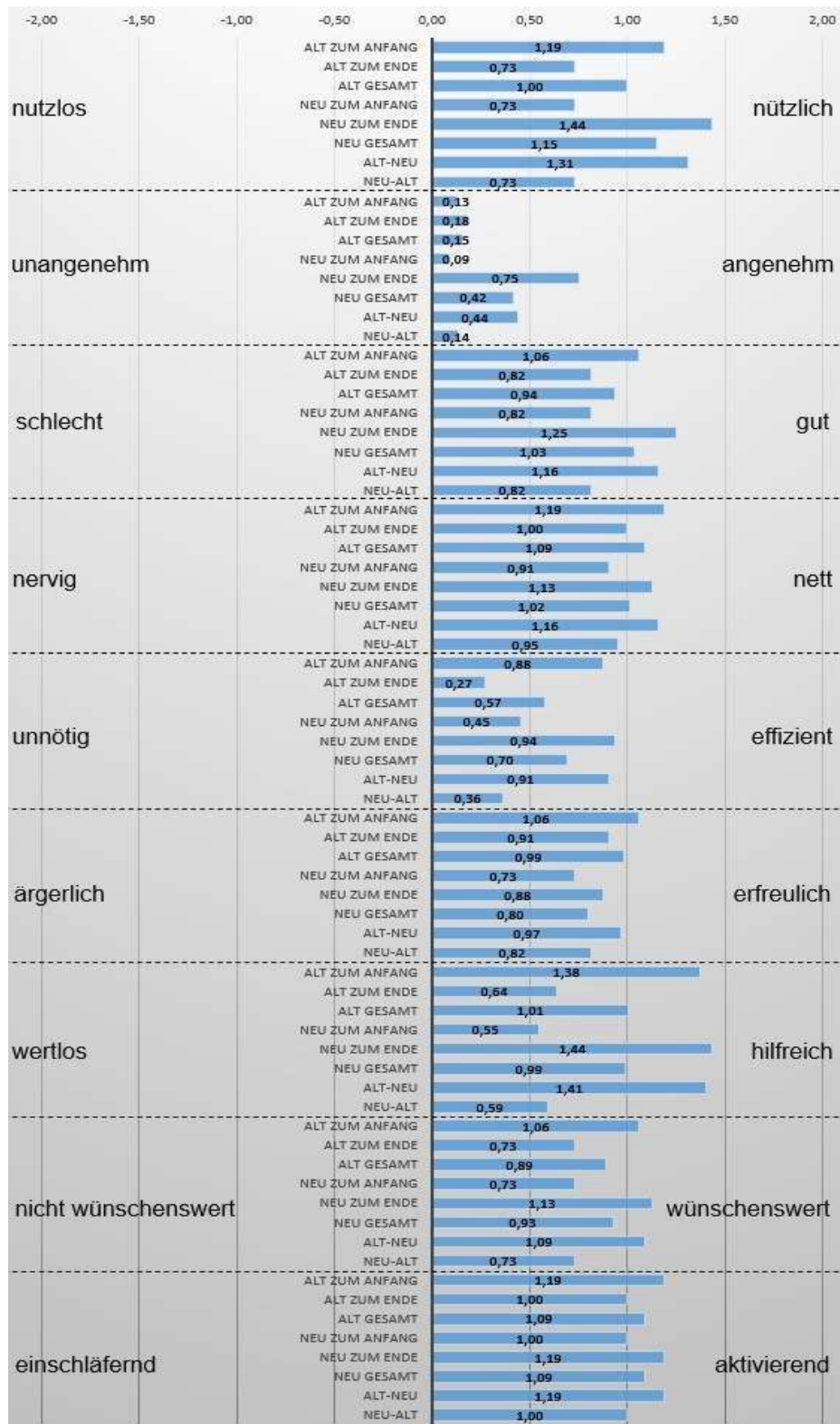
Vielen Dank!

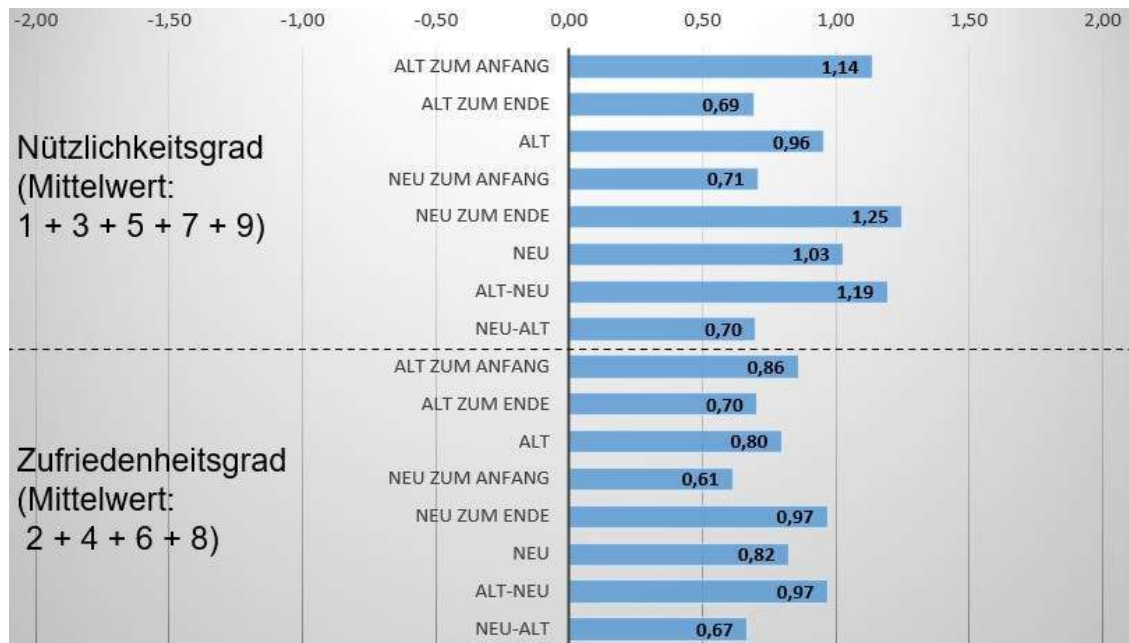
Ihre Antworten wurden gespeichert, Sie können das Browser-Fenster nun schließen.

Institut für Verkehrssystemtechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – 2022

Anhang D – Auswertung Probandenstudie

Akzeptanzauswertung





| | | | \bar{X} | Normiert auf -2 bis +2 |
|-------------------------|-------------|----------------|-----------|---------------------------|
| nützlich/ nutzlos | Alt | Alt zum Anfang | 1,81 | 1,19 |
| | | Alt zum Ende | 2,27 | 0,73 |
| | | Gesamt | 2,00 | 1,00 |
| | Neu | Neu zum Anfang | 2,27 | 0,73 |
| | | Neu zum Ende | 1,56 | 1,44 |
| | | Gesamt | 1,85 | 1,15 |
| | Reihenfolge | Alt-Neu | 1,69 | 1,31 |
| Neu-Alt | | 2,27 | 0,73 | |
| angenehm/ unangenehm | Alt | Alt zum Anfang | 2,88 | 0,13 |
| | | Alt zum Ende | 2,82 | 0,18 |
| | | Gesamt | 2,85 | 0,15 |
| | Neu | Neu zum Anfang | 2,91 | 0,09 |
| | | Neu zum Ende | 2,25 | 0,75 |
| | | Gesamt | 2,52 | 0,48 |
| | Reihenfolge | Alt-Neu | 2,56 | 0,44 |
| Neu-Alt | | 2,86 | 0,14 | |
| gut/ schlecht | Alt | Alt zum Anfang | 4,06 | 1,06 |
| | | Alt zum Ende | 3,82 | 0,82 |
| | | Gesamt | 3,96 | 0,96 |
| | Neu | Neu zum Anfang | 3,82 | 0,82 |
| | | Neu zum Ende | 4,25 | 1,25 |
| | | Gesamt | 4,07 | 1,07 |
| | Reihenfolge | Alt-Neu | 4,16 | 1,16 |
| Neu-Alt | | 3,82 | 0,82 | |

| | | | \bar{x} | Normiert auf -2 bis +2 |
|--|-----------------------|----------------|----------------|---------------------------|
| nett/ nervig | Alt | Alt zum Anfang | 1,81 | 1,19 |
| | | Alt zum Ende | 2,00 | 1,00 |
| | | Gesamt | 1,89 | 1,11 |
| | Neu | Neu zum Anfang | 2,09 | 0,91 |
| | | Neu zum Ende | 1,88 | 1,13 |
| | | Gesamt | 1,96 | 1,04 |
| | Reihenfolge | Alt-Neu | 1,84 | 1,16 |
| | | Neu-Alt | 2,05 | 0,95 |
| | effizient/ unnötig | Alt | Alt zum Anfang | 2,13 |
| Alt zum Ende | | | 2,73 | 0,27 |
| Gesamt | | | 2,37 | 0,63 |
| Neu | | Neu zum Anfang | 2,55 | 0,45 |
| | | Neu zum Ende | 2,06 | 0,94 |
| | | Gesamt | 2,26 | 0,74 |
| Reihenfolge | | Alt-Neu | 2,09 | 0,91 |
| | | Neu-Alt | 2,64 | 0,36 |
| erfreulich/ ärgerlich | | Alt | Alt zum Anfang | 4,06 |
| | Alt zum Ende | | 3,91 | 0,91 |
| | Gesamt | | 4,00 | 1,00 |
| | Neu | Neu zum Anfang | 3,73 | 0,73 |
| | | Neu zum Ende | 3,88 | 0,88 |
| | | Gesamt | 3,81 | 0,81 |
| | Reihenfolge | Alt-Neu | 3,97 | 0,97 |
| | | Neu-Alt | 3,82 | 0,82 |
| | hilfreich/ wertlos | Alt | Alt zum Anfang | 1,63 |
| Alt zum Ende | | | 2,36 | 0,64 |
| Gesamt | | | 1,93 | 1,07 |
| Neu | | Neu zum Anfang | 2,45 | 0,55 |
| | | Neu zum Ende | 1,56 | 1,44 |
| | | Gesamt | 1,93 | 1,07 |
| Reihenfolge | | Alt-Neu | 1,59 | 1,41 |
| | | Neu-Alt | 2,41 | 0,59 |
| wünschens- wert/ nicht wünschens- wert | | Alt | Alt zum Anfang | 4,06 |
| | Alt zum Ende | | 3,73 | 0,73 |
| | Gesamt | | 3,93 | 0,93 |
| | Neu | Neu zum Anfang | 3,73 | 0,73 |
| | | Neu zum Ende | 4,13 | 1,13 |
| | | Gesamt | 3,96 | 0,96 |
| | Reihenfolge | Alt-Neu | 4,09 | 1,09 |
| | | Neu-Alt | 3,73 | 0,73 |

| | | | \bar{x} | Normiert auf -2 bis +2 |
|---|--|----------------|----------------|---------------------------|
| aktivierend/ einschläfernd | Alt | Alt zum Anfang | 1,81 | 1,19 |
| | | Alt zum Ende | 2,00 | 1,00 |
| | | Gesamt | 1,89 | 1,11 |
| | Neu | Neu zum Anfang | 2,00 | 1,00 |
| | | Neu zum Ende | 1,81 | 1,19 |
| | | Gesamt | 1,89 | 1,11 |
| | Reihenfolge | Alt-Neu | 1,81 | 1,19 |
| | | Neu-Alt | 2,00 | 1,00 |
| | Nützlichkeits- grad (Mittel- wert: 1+3+5+7+9) | Alt | Alt zum Anfang | |
| Alt zum Ende | | | | 0,69 |
| Gesamt | | | | 0,96 |
| Neu | | Neu zum Anfang | | 0,71 |
| | | Neu zum Ende | | 1,25 |
| | | Gesamt | | 1,03 |
| Reihenfolge | | Alt-Neu | | 1,19 |
| | | Neu-Alt | | 0,70 |
| Zufriedenheits- grad (Mittelwert: 2+4+6+8) | | Alt | Alt zum Anfang | |
| | Alt zum Ende | | | 0,70 |
| | Gesamt | | | 0,80 |
| | Neu | Neu zum Anfang | | 0,61 |
| | | Neu zum Ende | | 0,97 |
| | | Gesamt | | 0,82 |
| | Reihenfolge | Alt-Neu | | 0,97 |
| | | Neu-Alt | | 0,67 |

Zweistichproben t-Test bei abhängigen Stichproben
(Paarvergleichstest)

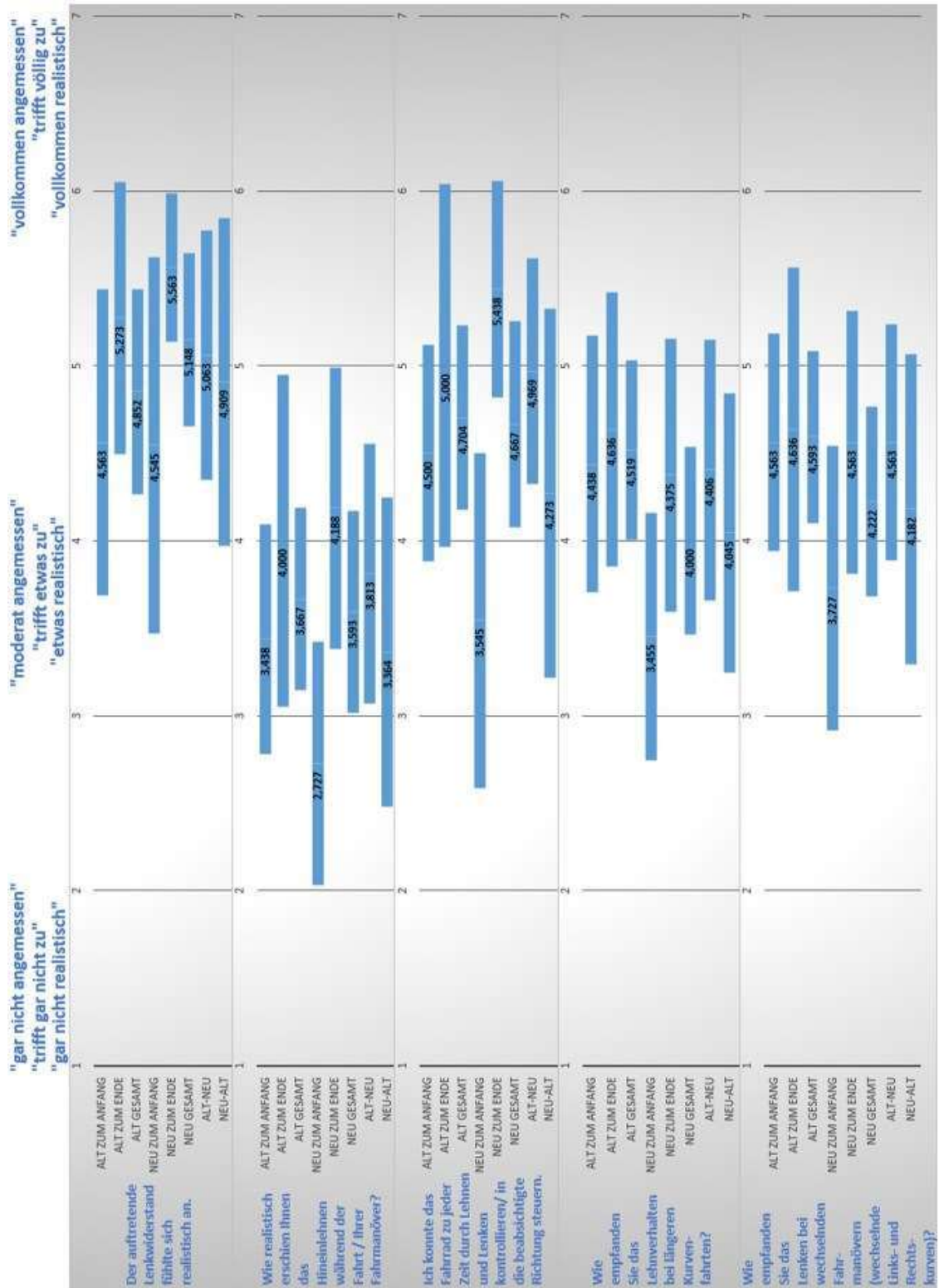
| <i>Akzeptanz: nützlich/nutzlos</i> | <i>Alt gesamt</i> | <i>Neu gesamt</i> |
|---|-------------------|-------------------|
| Mittelwert | 1,000 | 1,148 |
| Varianz | 0,615 | 0,516 |
| Beobachtungen | 27,000 | 27,000 |
| Pearson Korrelation | 0,819 | |
| Hypothetische Differenz der Mittelwerte | 0,000 | |
| Freiheitsgrade (df) | 26,000 | |
| t-Statistik | -1,688 | |
| P(T<=t) einseitig | 0,052 | |
| Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test | 1,315 | |
| P(T<=t) zweiseitig | 0,103 | |
| Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test | 1,706 | |

| <i>Akzeptanz: angenehm/unangenehm</i> | <i>Alt gesamt</i> | <i>Neu gesamt</i> |
|---|-------------------|-------------------|
| Mittelwert | 0,148 | 0,481 |
| Varianz | 1,131 | 1,182 |
| Beobachtungen | 27,000 | 27,000 |
| Pearson Korrelation | 0,601 | |
| Hypothetische Differenz der Mittelwerte | 0,000 | |
| Freiheitsgrade (df) | 26,000 | |
| t-Statistik | -1,803 | |
| P(T<=t) einseitig | 0,042 | |
| Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test | 1,315 | |
| P(T<=t) zweiseitig | 0,083 | |
| Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test | 1,706 | |
| <i>Akzeptanz: schlecht/gut</i> | <i>Alt gesamt</i> | <i>Neu gesamt</i> |
| Mittelwert | 0,963 | 1,074 |
| Varianz | 0,806 | 0,687 |
| Beobachtungen | 27,000 | 27,000 |
| Pearson Korrelation | 0,779 | |
| Hypothetische Differenz der Mittelwerte | 0,000 | |
| Freiheitsgrade (df) | 26,000 | |
| t-Statistik | -1,000 | |
| P(T<=t) einseitig | 0,163 | |
| Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test | 1,315 | |
| P(T<=t) zweiseitig | 0,327 | |
| Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test | 1,706 | |
| <i>Akzeptanz: nett/nervig</i> | <i>Alt gesamt</i> | <i>Neu gesamt</i> |
| Mittelwert | 1,111 | 1,037 |
| Varianz | 0,949 | 1,037 |
| Beobachtungen | 27,000 | 27,000 |
| Pearson Korrelation | 0,771 | |
| Hypothetische Differenz der Mittelwerte | 0,000 | |
| Freiheitsgrade (df) | 26,000 | |
| t-Statistik | 0,570 | |
| P(T<=t) einseitig | 0,287 | |
| Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test | 1,315 | |
| P(T<=t) zweiseitig | 0,574 | |
| Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test | 1,706 | |
| <i>Akzeptanz: effizient/unnötig</i> | <i>Alt gesamt</i> | <i>Neu gesamt</i> |
| Mittelwert | 0,630 | 0,741 |
| Varianz | 0,781 | 0,507 |
| Beobachtungen | 27,000 | 27,000 |
| Pearson Korrelation | 0,820 | |
| Hypothetische Differenz der Mittelwerte | 0,000 | |
| Freiheitsgrade (df) | 26,000 | |
| t-Statistik | -1,140 | |
| P(T<=t) einseitig | 0,132 | |
| Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test | 1,315 | |
| P(T<=t) zweiseitig | 0,265 | |
| Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test | 1,706 | |

| <i>Akzeptanz: ärgerlich/erfreulich</i> | <i>Alt gesamt</i> | <i>Neu gesamt</i> |
|---|-------------------|-------------------|
| Mittelwert | 1,000 | 0,815 |
| Varianz | 0,846 | 0,772 |
| Beobachtungen | 27,000 | 27,000 |
| Pearson Korrelation | 0,857 | |
| Hypothetische Differenz der Mittelwerte | 0,000 | |
| Freiheitsgrade (df) | 26,000 | |
| t-Statistik | 1,991 | |
| P(T<=t) einseitig | 0,029 | |
| Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test | 1,315 | |
| P(T<=t) zweiseitig | 0,057 | |
| Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test | 1,706 | |
| <i>Akzeptanz: hilfreich/wertlos</i> | <i>Alt gesamt</i> | <i>Neu gesamt</i> |
| Mittelwert | 1,074 | 1,074 |
| Varianz | 0,533 | 0,610 |
| Beobachtungen | 27,000 | 27,000 |
| Pearson Korrelation | 0,732 | |
| Hypothetische Differenz der Mittelwerte | 0,000 | |
| Freiheitsgrade (df) | 26,000 | |
| t-Statistik | 0,000 | |
| P(T<=t) einseitig | 0,500 | |
| Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test | 1,315 | |
| P(T<=t) zweiseitig | 1,000 | |
| Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test | 1,706 | |
| <i>Akzeptanz: nicht wünschenswert/wünschenswert</i> | <i>Alt gesamt</i> | <i>Neu gesamt</i> |
| Mittelwert | 0,926 | 0,963 |
| Varianz | 0,610 | 0,729 |
| Beobachtungen | 27,000 | 27,000 |
| Pearson Korrelation | 0,861 | |
| Hypothetische Differenz der Mittelwerte | 0,000 | |
| Freiheitsgrade (df) | 26,000 | |
| t-Statistik | -0,440 | |
| P(T<=t) einseitig | 0,332 | |
| Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test | 1,315 | |
| P(T<=t) zweiseitig | 0,663 | |
| Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test | 1,706 | |
| <i>Akzeptanz: aktivierend/einschläfernd</i> | <i>Alt gesamt</i> | <i>Neu gesamt</i> |
| Mittelwert | 1,111 | 1,111 |
| Varianz | 1,179 | 0,795 |
| Beobachtungen | 27,000 | 27,000 |
| Pearson Korrelation | 0,821 | |
| Hypothetische Differenz der Mittelwerte | 0,000 | |
| Freiheitsgrade (df) | 26,000 | |
| t-Statistik | 0,000 | |
| P(T<=t) einseitig | 0,500 | |
| Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test | 1,315 | |
| P(T<=t) zweiseitig | 1,000 | |
| Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test | 1,706 | |

| <i>Nützlichkeitsgrad</i> | <i>Alt gesamt</i> | <i>Neu gesamt</i> |
|---|-------------------|-------------------|
| Mittelwert | 0,956 | 1,030 |
| Varianz | 0,789 | 0,626 |
| Beobachtungen | 135,000 | 135,000 |
| Pearson Korrelation | 0,798 | |
| Hypothetische Differenz der Mittelwerte | 0,000 | |
| Freiheitsgrade (df) | 134,000 | |
| t-Statistik | -1,590 | |
| P(T<=t) einseitig | 0,057 | |
| Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test | 1,288 | |
| P(T<=t) zweiseitig | 0,114 | |
| Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test | 1,656 | |
| <i>Zufriedenheitsgrad</i> | <i>Alt gesamt</i> | <i>Neu gesamt</i> |
| Mittelwert | 0,796 | 0,824 |
| Varianz | 1,005 | 0,950 |
| Beobachtungen | 108,000 | 108,000 |
| Pearson Korrelation | 0,757 | |
| Hypothetische Differenz der Mittelwerte | 0,000 | |
| Freiheitsgrade (df) | 107,000 | |
| t-Statistik | -0,418 | |
| P(T<=t) einseitig | 0,338 | |
| Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test | 1,290 | |
| P(T<=t) zweiseitig | 0,676 | |
| Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test | 1,659 | |

Realitätsauswertung

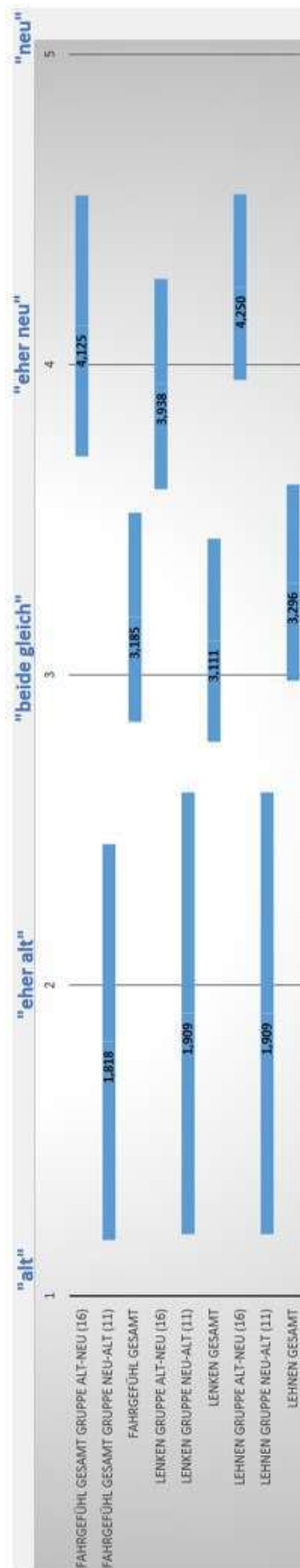


| | | | \bar{X} | SD | n | t_c | uCI | oCI | $\frac{\Delta CI}{2}$ |
|--------------------------------------|--|----------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|
| Lenk-widerstand | Alt | Alt zum Anfang | 4,563 | 1,999 | 16 | 1,753 | 3,686 | 5,439 | 0,876 |
| | | Alt zum Ende | 5,273 | 1,421 | 11 | 1,812 | 4,497 | 6,049 | 0,776 |
| | | Gesamt | 4,852 | 1,791 | 27 | 1,706 | 4,264 | 5,440 | 0,588 |
| | Neu | Neu zum Anfang | 4,545 | 1,968 | 11 | 1,812 | 3,470 | 5,621 | 1,075 |
| | | Neu zum Ende | 5,563 | 0,964 | 16 | 1,753 | 5,140 | 5,985 | 0,422 |
| | | Gesamt | 5,148 | 1,512 | 27 | 1,706 | 4,652 | 5,644 | 0,496 |
| | Reihen-folge | Alt-Neu | 5,063 | 1,625 | 16 | 1,753 | 4,350 | 5,775 | 0,712 |
| | | Neu-Alt | 4,909 | 1,716 | 11 | 1,812 | 3,972 | 5,846 | 0,937 |
| | Hinein-lehnen | Alt | Alt zum Anfang | 3,438 | 1,504 | 16 | 1,753 | 2,778 | 4,097 |
| Alt zum Ende | | | 4,000 | 1,732 | 11 | 1,812 | 3,054 | 4,946 | 0,946 |
| Gesamt | | | 3,667 | 1,593 | 27 | 1,706 | 3,144 | 4,190 | 0,523 |
| Neu | | Neu zum Anfang | 2,727 | 1,272 | 11 | 1,812 | 2,032 | 3,422 | 0,695 |
| | | Neu zum Ende | 4,188 | 1,834 | 16 | 1,753 | 3,384 | 4,991 | 0,804 |
| | | Gesamt | 3,593 | 1,760 | 27 | 1,706 | 3,015 | 4,170 | 0,578 |
| Reihenfolge | | Alt-Neu | 3,813 | 1,693 | 16 | 1,753 | 3,070 | 4,555 | 0,742 |
| | | Neu-Alt | 3,364 | 1,620 | 11 | 1,812 | 2,479 | 4,249 | 0,885 |
| Kontrolle durch Lehnen und Lehnen | | Alt | Alt zum Anfang | 4,500 | 1,414 | 16 | 1,753 | 3,880 | 5,120 |
| | Alt zum Ende | | 5,000 | 1,897 | 11 | 1,812 | 3,963 | 6,037 | 1,037 |
| | Gesamt | | 4,704 | 1,613 | 27 | 1,706 | 4,174 | 5,233 | 0,530 |
| | Neu | Neu zum Anfang | 3,545 | 1,753 | 11 | 1,812 | 2,588 | 4,503 | 0,958 |
| | | Neu zum Ende | 5,438 | 1,413 | 16 | 1,753 | 4,818 | 6,057 | 0,619 |
| | | Gesamt | 4,667 | 1,797 | 27 | 1,706 | 4,077 | 5,257 | 0,590 |
| | Reihenfolge | Alt-Neu | 4,969 | 1,470 | 16 | 1,753 | 4,325 | 5,613 | 0,644 |
| | | Neu-Alt | 4,273 | 1,932 | 11 | 1,812 | 3,217 | 5,328 | 1,055 |
| | Lehn-verhalten bei langen Kurven-fahrten | Alt | Alt zum Anfang | 4,438 | 1,672 | 16 | 1,753 | 3,705 | 5,170 |
| Alt zum Ende | | | 4,636 | 1,433 | 11 | 1,812 | 3,853 | 5,419 | 0,783 |
| Gesamt | | | 4,519 | 1,553 | 27 | 1,706 | 4,009 | 5,029 | 0,510 |
| Neu | | Neu zum Anfang | 3,455 | 1,293 | 11 | 1,812 | 2,748 | 4,161 | 0,707 |
| | | Neu zum Ende | 4,375 | 1,784 | 16 | 1,753 | 3,593 | 5,157 | 0,782 |
| | | Gesamt | 4,000 | 1,641 | 27 | 1,706 | 3,461 | 4,539 | 0,539 |
| Reihenfolge | | Alt-Neu | 4,406 | 1,701 | 16 | 1,753 | 3,661 | 5,152 | 0,746 |
| | | Neu-Alt | 4,045 | 1,463 | 11 | 1,812 | 3,246 | 4,845 | 0,799 |
| Lenken bei wechselnden Fahr-manövern | | Alt | Alt zum Anfang | 4,563 | 1,413 | 16 | 1,753 | 3,943 | 5,182 |
| | Alt zum Ende | | 4,636 | 1,690 | 11 | 1,812 | 3,713 | 5,559 | 0,923 |
| | Gesamt | | 4,593 | 1,500 | 27 | 1,706 | 4,100 | 5,085 | 0,493 |
| | Neu | Neu zum Anfang | 3,727 | 1,489 | 11 | 1,812 | 2,914 | 4,541 | 0,814 |
| | | Neu zum Ende | 4,563 | 1,711 | 16 | 1,753 | 3,812 | 5,313 | 0,750 |
| | | Gesamt | 4,222 | 1,649 | 27 | 1,706 | 3,681 | 4,763 | 0,541 |
| | Reihenfolge | Alt-Neu | 4,563 | 1,544 | 16 | 1,753 | 3,886 | 5,239 | 0,677 |
| | | Neu-Alt | 4,182 | 1,622 | 11 | 1,812 | 3,295 | 5,068 | 0,886 |

Zweistichproben t-Test bei abhängigen Stichproben (Paarvergleichstest)

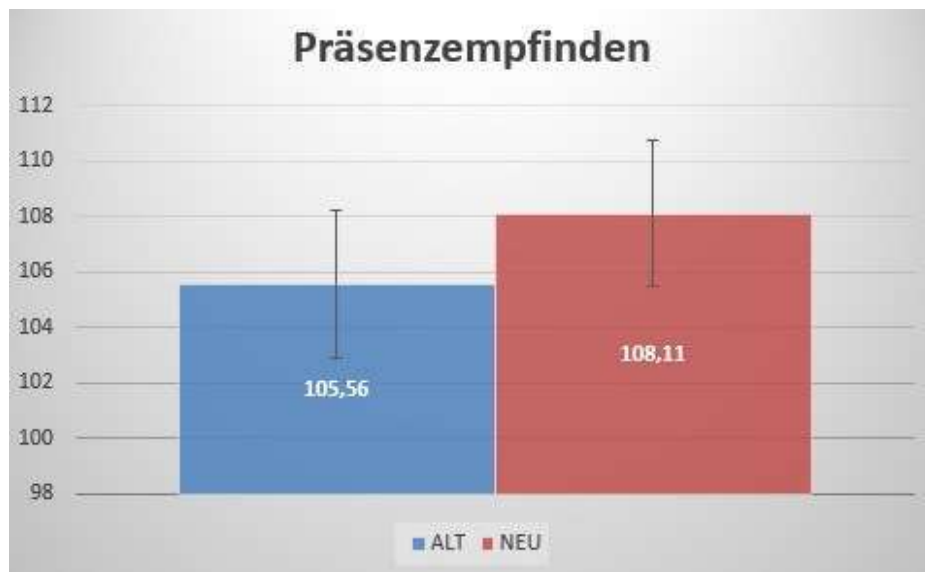
| | <i>Alt gesamt</i> | <i>Neu gesamt</i> |
|---|-----------------------|-----------------------|
| <i>Lenkwiderstand / QL06</i> | | |
| Mittelwert | 4,852 | 5,148 |
| Varianz | 3,208 | 2,285 |
| Beobachtungen | 27,000 | 27,000 |
| Pearson Korrelation | 0,364 | |
| Hypothetische Differenz der Mittelwerte | 0,000 | |
| Freiheitsgrade (df) | 26,000 | |
| t-Statistik | -0,820 | |
| P(T<=t) einseitig | 0,210 | |
| Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test | 1,315 | |
| P(T<=t) zweiseitig | 0,420 | |
| Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test | 1,706 | |
| <i>Lehnen / QL07</i> | | |
| | <i>Alt gesamt</i> | <i>Neu gesamt</i> |
| Mittelwert | 3,667 | 3,593 |
| Varianz | 2,538 | 3,097 |
| Beobachtungen | 27,000 | 27,000 |
| Pearson Korrelation | 0,279 | |
| Hypothetische Differenz der Mittelwerte | 0,000 | |
| Freiheitsgrade (df) | 26,000 | |
| t-Statistik | 0,191 | |
| P(T<=t) einseitig | 0,425 | |
| Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test | 1,315 | |
| P(T<=t) zweiseitig | 0,850 | |
| Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test | 1,706 | |
| <i>Lehnen & Lenken / QL08</i> | | |
| | <i>Alt gesamt</i> | <i>Neu gesamt</i> |
| Mittelwert | 4,704 | 4,667 |
| Varianz | 2,601 | 3,231 |
| Beobachtungen | 27,000 | 27,000 |
| Pearson Korrelation | 0,097 | |
| Hypothetische Differenz der Mittelwerte | 0,000 | |
| Freiheitsgrade (df) | 26,000 | |
| t-Statistik | 0,084 | |
| P(T<=t) einseitig | 0,467 | |
| Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test | 1,315 | |
| P(T<=t) zweiseitig | 0,934 | |
| Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test | 1,706 | |
| <i>Lenkverhalten / QL09</i> | | |
| | <i>Alt gesamt</i> | <i>Neu gesamt</i> |
| Mittelwert | 4,519 | 4,000 |
| Varianz | 2,413 | 2,692 |
| Beobachtungen | 27,000 | 27,000 |
| Pearson Korrelation | 0,241 | |
| Hypothetische Differenz der Mittelwerte | 0,000 | |
| Freiheitsgrade (df) | 26,000 | |
| t-Statistik | 1,369 | |
| P(T<=t) einseitig | 0,091 | |
| Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test | 1,315 | |
| P(T<=t) zweiseitig | 0,183 | |
| Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test | 1,706 | |

| <i>Wechselnde Lenkmanöver / QL12</i> | <i>Alt gesamt</i> | <i>Neu gesamt</i> |
|---|-------------------|-------------------|
| Mittelwert | 4,593 | 4,222 |
| Varianz | 2,251 | 2,718 |
| Beobachtungen | 27,000 | 27,000 |
| Pearson Korrelation | 0,411 | |
| Hypothetische Differenz der Mittelwerte | 0,000 | |
| Freiheitsgrade (df) | 26,000 | |
| t-Statistik | 1,123 | |
| P(T<=t) einseitig | 0,136 | |
| Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test | 1,315 | |
| P(T<=t) zweiseitig | 0,272 | |
| Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test | 1,706 | |

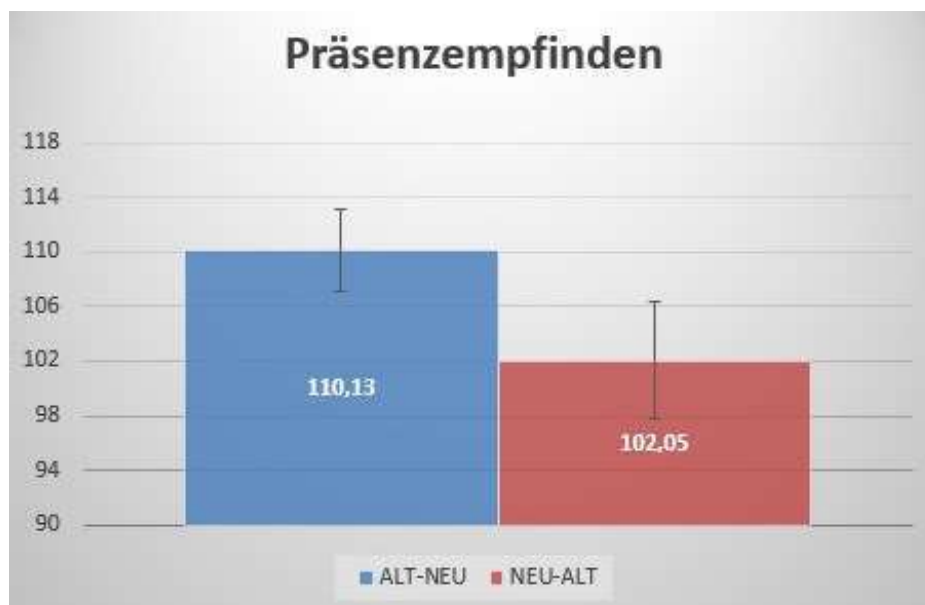


| | | \bar{X} | SD | n | t_c | uCI | oCI | $\frac{\Delta CI}{2}$ |
|--|---------------------------|-----------|-------|-----|-------|-------|-------|-----------------------|
| Bei welchem Durchgang empfanden Sie das Lenken realitätsgetreuer? | Lenken Gruppe Alt-Neu | 3,938 | 0,772 | 16 | 1,753 | 3,599 | 4,276 | 0,338 |
| | Lenken Gruppe Neu-Alt | 1,909 | 1,300 | 11 | 1,812 | 1,199 | 2,620 | 0,710 |
| | Lenken gesamt | 3,111 | 1,000 | 27 | 1,706 | 2,783 | 3,439 | 0,328 |
| Bei welchem Durchgang empfanden Sie das Lehnen realitätsgetreuer? | Lehnen Gruppe Alt-Neu | 4,250 | 0,683 | 16 | 1,753 | 3,951 | 4,549 | 0,299 |
| | Lehnen Gruppe Neu-Alt | 1,909 | 1,300 | 11 | 1,812 | 1,199 | 2,620 | 0,710 |
| | Lehnen gesamt | 3,296 | 0,962 | 27 | 1,706 | 2,980 | 3,612 | 0,316 |
| Welcher Teil kommt Ihrer Meinung nach dem echten Fahrgefühl näher? | Fahrgefühl Gruppe Alt-Neu | 4,125 | 0,957 | 16 | 1,753 | 3,705 | 4,545 | 0,420 |
| | Fahrgefühl Gruppe Neu-Alt | 1,818 | 1,168 | 11 | 1,812 | 1,180 | 2,456 | 0,638 |
| | Fahrgefühl gesamt | 3,185 | 1,027 | 27 | 1,706 | 2,848 | 3,522 | 0,337 |

Präsenzauswertung

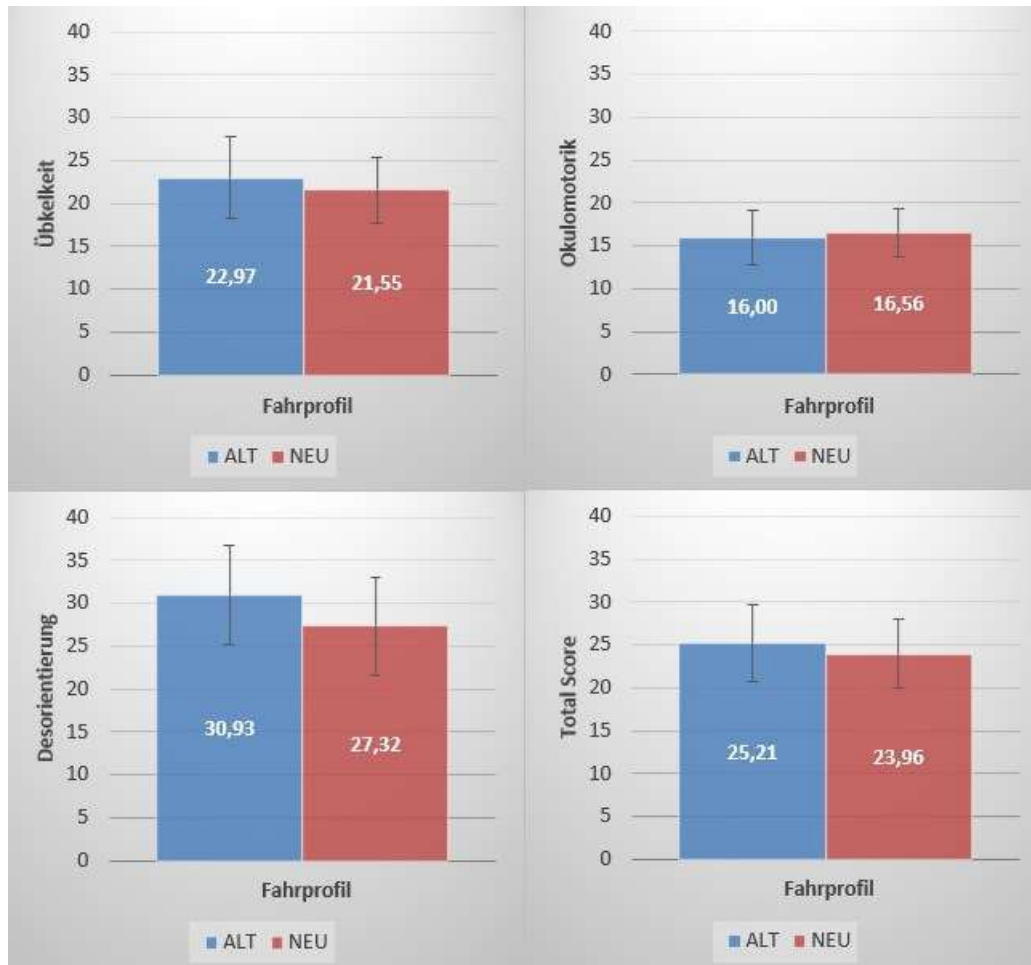


| | Mittelwert \bar{X} | Standardabweichung | Standardfehler |
|----------------|----------------------|--------------------|----------------|
| Fahrprofil Alt | 105,56 | 13,84 | 2,66 |
| Fahrprofil Neu | 108,11 | 13,59 | 2,62 |

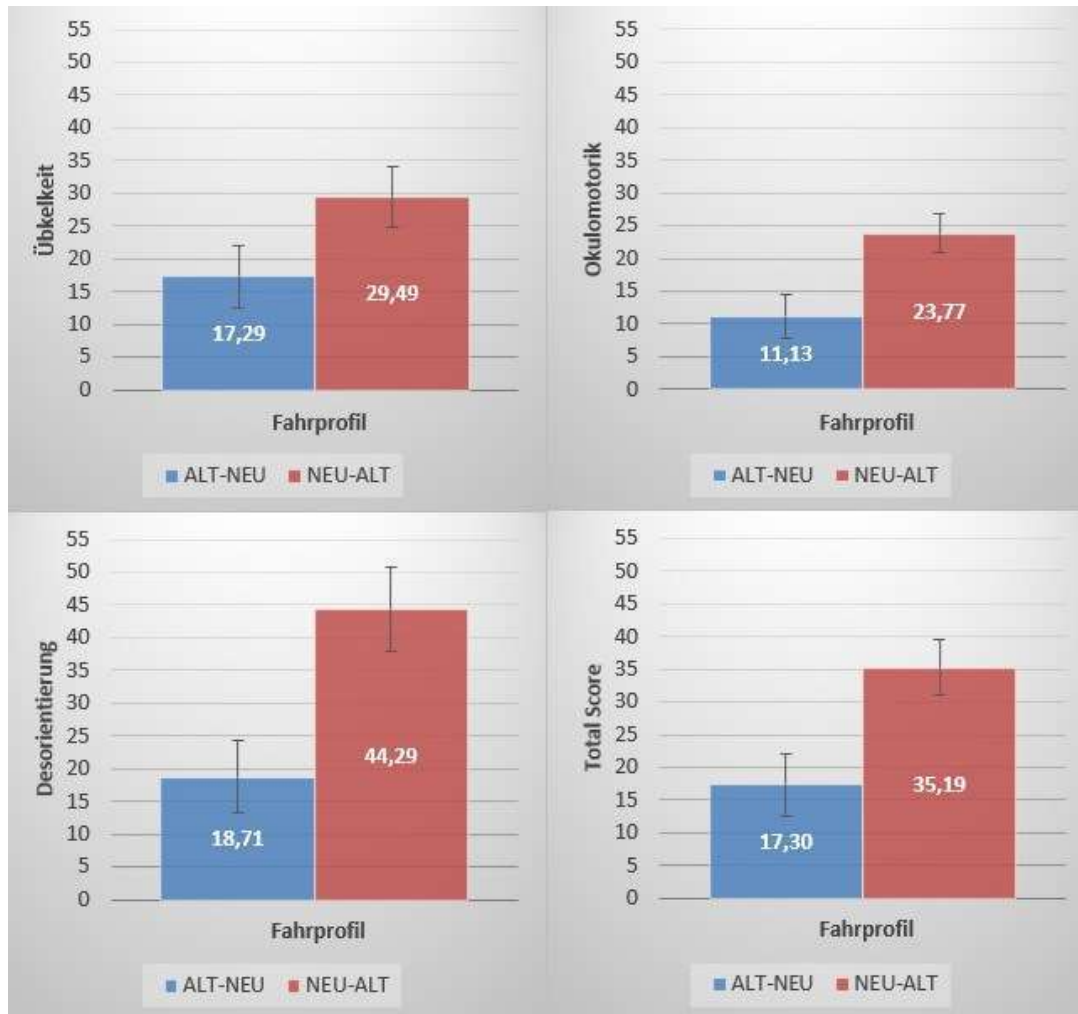


| | Mittelwert \bar{X} | Standardabweichung | Standardfehler |
|---------|----------------------|--------------------|----------------|
| Alt-Neu | 110,13 | 12,30 | 3,08 |
| Neu-Alt | 102,05 | 14,35 | 4,33 |

Simulation Sickness-Auswertung



| | Mittelwerte \bar{X} | | | |
|----------------|-----------------------|--------------|-----------------|-------------|
| | Übelkeit | Okulomotorik | Desorientierung | Total Score |
| Fahrprofil Alt | 22,97 | 16,00 | 30,93 | 25,21 |
| Fahrprofil Neu | 21,55 | 16,56 | 27,32 | 23,96 |
| | Standardabweichungen | | | |
| | Übelkeit | Okulomotorik | Desorientierung | Total Score |
| Fahrprofil Alt | 24,72 | 16,33 | 30,24 | 23,16 |
| Fahrprofil Neu | 19,73 | 14,72 | 30,02 | 21,11 |
| | Standardfehler | | | |
| | Übelkeit | Okulomotorik | Desorientierung | Total Score |
| Fahrprofil Alt | 4,76 | 3,14 | 5,82 | 4,46 |
| Fahrprofil Neu | 3,80 | 2,83 | 5,78 | 4,06 |



| | Mittelwerte \bar{X} | | | |
|----------------|-----------------------|--------------|-----------------|-------------|
| | Übelkeit | Okulomotorik | Desorientierung | Total Score |
| Alt-Neu | 17,29 | 11,13 | 18,71 | 17,30 |
| Neu-Alt | 29,49 | 23,77 | 44,29 | 35,19 |
| | Standardabweichungen | | | |
| | Übelkeit | Okulomotorik | Desorientierung | Total Score |
| Alt-Neu | 19,30 | 13,34 | 22,25 | 18,95 |
| Neu-Alt | 24,44 | 15,39 | 33,45 | 22,10 |
| | Standardfehler | | | |
| | Übelkeit | Okulomotorik | Desorientierung | Total Score |
| Alt-Neu | 4,82 | 3,33 | 5,56 | 4,74 |
| Neu-Alt | 4,70 | 2,96 | 6,44 | 4,25 |