

# BACHELOR-THESIS

DIPLOMA Hochschule

Private Fachhochschule Nordhessen

# DIPLOMA

Private staatlich anerkannte Hochschule  
University of Applied Sciences

## Studiengang Mechatronik

### **Konzeptentwicklung, Umsetzung und Evaluation der Längsdynamik eines Fahrradsimulators für eine realitätsnahe, interaktive Simulation**

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

vorgelegt von: Dennis Jacobi

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 Längsdynamik 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 .....	IX
1 Einleitung .....	1
2 Grundlagen und Stand der Technik .....	4
2.1 Fahrsimulatoren mit verkehrstechnischem Bezug.....	4
2.2 Sinnesverarbeitung in der Simulation.....	9
2.2.1 Vestibuläres System .....	10
2.2.2 Visuelles System .....	11
2.2.3 Simulatorkrankheit.....	11
2.3 Fahrradsimulatoren .....	13
2.3.1 Anwendungsgebiete .....	14
2.4 Fahrradphysik und -mechanik .....	15
2.4.1 Krafteinwirkung am Fahrrad.....	15
2.4.2 Bauarten von Bremsen .....	16
3 Analyse und Konzeptoptimierung der Längsdynamik .....	20
3.1 Subsysteme der BikeSim-Simulationsumgebung.....	20
3.2 Ausgangszustand Rollentrainer .....	22
3.2.1 Informationsübertragung.....	23
3.2.2 Messverfahren.....	24
3.3 Ausgangszustand Bremsen .....	25
3.4 Ausgangszustand Fahrtwindsimulation .....	26
3.5 Anforderungsprofil.....	26
3.6 Konzeptoptimierung Geschwindigkeitsmessung & Bremssystem .....	28
3.6.1 Konzeptfindung Geschwindigkeitsmessung .....	28
3.6.2 Konzeptfindung Bremssystem .....	32
3.6.3 Konzeptumsetzung Geschwindigkeitsmessung & Bremssystem..	33

3.7	Konzeptoptimierung Fahrtwind.....	38
3.8	Analyse Bremsensystem.....	41
3.9	Analyse Geschwindigkeitsmessung .....	45
4	Probandenstudie.....	46
4.1	Validierungsfragen und -hypothesen.....	47
4.2	Entwicklung der Trainings und Szenarien .....	48
4.3	Durchführung der Probandenstudie .....	51
4.4	Bewertung der Studienergebnisse .....	52
4.5	Untersuchung der subjektiven Kriterien.....	54
5	Schlussfolgerung .....	61
5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	61
5.2	Interpretation der Ergebnisse.....	62
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	66
6.1	Zusammenfassung.....	66
6.2	Ausblick.....	68
	Literaturverzeichnis .....	XI
	Anlagenverzeichnis .....	XVII

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur der Arbeit .....	3
Abbildung 2: Bogengangsorgane und Maculaorgane des Innenohres .....	10
Abbildung 3: Krafteinwirkung am Fahrrad .....	16
Abbildung 4: Rennrad-Seitenzugbremse.....	17
Abbildung 5: V-Bremse .....	17
Abbildung 6: Vorderrad Trommelbremse .....	18
Abbildung 7: Scheibenbremse.....	19
Abbildung 8: BikeSim-Simulationsumgebung.....	20
Abbildung 9: Überblick der Datenübertragungsraten & Reichweiten gängiger Funknetzstandards.....	23
Abbildung 10: Gabel-Lichtschranke des Rollentrainers.....	24
Abbildung 11: Geberrad am Schwungrad .....	24
Abbildung 12: Ausgangszustand Bremsanlage .....	25
Abbildung 13: Bauraumüberprüfung anhand Bereichsmodell .....	34
Abbildung 14: 3D-Modell Montageeinheit.....	35
Abbildung 15: Montageeinheit.....	35
Abbildung 16: Differentielle Datenübertragung.....	36
Abbildung 17: Hexadezimal-Format für Geschwindigkeitserfassung.....	37
Abbildung 18: Berechnungsroutine zur Geschwindigkeitserfassung .....	38
Abbildung 19: GATT Struktur & BLE Client/Server Kommunikationsprinzip.....	39
Abbildung 20: Ausschnitt GATT Struktur Headwind-Simulator.....	40
Abbildung 21: Wirksame Radien (gelb) beider Bremsanlagen .....	42
Abbildung 22: Vergleich Geschwindigkeitsplot BikeSim.....	45
Abbildung 23: Training ohne VR.....	48
Abbildung 24: Training mit VR.....	49
Abbildung 25: Szenario a.) (links) und Szenario b.) (rechts) .....	50
Abbildung 26: Szenario c.) (links) und Szenario d.) (rechts) .....	50
Abbildung 27: Szenario e.) (links) und Szenario f.) (rechts) .....	50
Abbildung 28: Ablauf der Studiendurchführung .....	52
Abbildung 29: VR-Erfahrung der erfolgreich teilgenommenen Probanden .....	53

Abbildung 30: Schwere der Reisekrankheit der erfolgreich teilgenommenen Probanden.....	53
Abbildung 31: Auswertung Akzeptanzgüte.....	54
Abbildung 32: Signifikante Akzeptanzattribute .....	55
Abbildung 33: Auswertung Nützlichkeits- und Zufriedenheitsgrad.....	55
Abbildung 34: Auswertung Akzeptanzgüte nach Reihenfolge .....	56
Abbildung 35: Auswertung Nützlichkeits- und Zufriedenheitsgrad nach Reihenfolge .....	56
Abbildung 36: Auswertung Realismus Fahrgeschwindigkeit .....	56
Abbildung 37: Auswertung Realismus Beschleunigungsvorgänge.....	57
Abbildung 38: Auswertung Realismus Fahrtwind .....	57
Abbildung 39: Auswertung Realismus Abschlussfragebogen .....	58
Abbildung 40: Auswertung Realismus Fahrgefühl.....	59
Abbildung 41: Auswertung SSQ bezüglich Fahrprofil.....	59
Abbildung 42: Auswertung SSQ bezüglich Reihenfolge.....	60

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungsliste.....	27
Tabelle 2: Tabelle Lösungsansätze Geschwindigkeitserfassung .....	31
Tabelle 3: Spezifikation des Inkremental Drehgebers .....	32
Tabelle 4: Übersicht der Werte zur Berechnung des Kreisschnitts $\alpha$ .....	44
Tabelle 5: Unterschiede der Fahrprofile .....	46
Tabelle 6: Validierungsfrage und Validierungshypothese.....	47
Tabelle 7: Auswertung Signifikanzniveau des Realismus nach Fahrprofilen....	57
Tabelle 8: Auswertung Signifikanzniveau des Realitätsgrades beim Abschlussfragebogen.....	58

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
B. Eng	Bachelor of Engineering
BLE	BLUETOOTH Low Energy
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
GATT	Generic Attribute
HMD	Head-Mounted Display
KFZ	Kraftfahrzeug
MISC	Misery Scale
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
MoSAIC	Modular and Scalable Application platform for ITS Components
PPR	Pulse per Rotation / Impulse pro Umdrehung
SD	Standardabweichung
SIG	(BLUETOOTH) Special Interest Group
SSQ	Simulation Sickness Questionnaire
UUID	Universally Unique Identifier
VL	Versuchsleitung
VP	Versuchsperson
VR	Virtual Reality
VRU	Vulnerable Road User

## Symbolverzeichnis

Symbol	Dimension	Erklärung
$a$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Beschleunigung
$E_{rot}$	Nm	Rotationsenergie
$F'$	N	Überschusskraft
$F_A$	N	Antriebskraft
$F_N$	N	Bremsnormalkraft
$F_R$	N	Reibkraft
$F_{RH}$	N	Reaktionskraft / Rollwiderstand
$i$	---	Übersetzungsverhältnis des Rollentrainers
$i_{ges}$	---	Gesamtverstärkung
$i_h$	---	Übersetzungsverhältnis am Griff
$i_z$	---	Übersetzungsverhältnis an der Bremse
$J$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	Trägheitsmoment
$m$	kg	Masse
$m_{SR}$	kg	Masse des Schwungrads
$n$	$\text{s}^{-1}$	Drehzahl
$N$	---	Stichprobengröße
$n_{Ritzel}$	$\text{s}^{-1}$	Drehzahl des Ritzels
$n_{SR}$	$\text{s}^{-1}$	Drehzahl des Schwungrads
$r_{Rad}$	m	Raddurchmesser / Fahrradgröße

Symbol	Dimension	Erklärung
$r_{SB}$	m	Wirksamer Radius der Scheibenbremse
$r_{SR}$	m	Radius des Schwungrads
$r_{VB}$	m	Wirksamer Radius der V-Brake
$r_w$	m	Wirksamer Radius
$s$	rad	Bogenmaß
$u_{Rad}$	m	Umfang des Rades
$v_F$	$\frac{m}{s}$	Fahrgeschwindigkeit
$W_R$	Nm	Reibungsarbeit
$z_{Antrieb}$	---	Zähnezahl beim Antrieb
$z_{Abtrieb}$	---	Zähnezahl beim Abtrieb
$z_{Ritzel}$	---	Zähnezahl des Ritzels
$z_{SR}$	---	Zähnezahl des Schwungrads
$\alpha$	°	Kreisschnitt / Bremsweg in Simulation
$\alpha_{SB}$	°	Kreisschnitt der Scheibenbremse
$\alpha_{VB}$	°	Kreisschnitt der V-Brake
$\mu_R$	---	Gleitreibungszahl
$\omega$	$s^{-1}$	Winkelgeschwindigkeit
$\omega_{Rad}$	$s^{-1}$	Winkelgeschwindigkeit des Rades
$\Delta t$	s	Zeitintervall / Deltzeit

# 1 Einleitung

Fahrradfahren hat einen großen Stellenwert und quantifizierbaren Einfluss auf das Leben eines jeden Menschen. Ein Beleg dafür sind Statistiken zu aktuellen Verkaufszahlen von Fahrrädern. Demnach werden weltweit jede Sekunde vier Fahrräder verkauft, das sind pro Jahr etwa 130 Millionen. Das Fahrrad steht für ein umweltfreundliches sowie preisgünstiges Verkehrsmittel, dessen Absatz heutzutage rund viermal höher ist als noch in den 70er Jahren (*Zahl der weltweit verkauften Fahrräder*, o. J.). Gründe hierfür sind u.a. die wachsende Beliebtheit an E-Bikes als auch die Einführung von Leihfahrrädern in Großstädten. Eines der größten Herausforderungen in Anbetracht dieser Entwicklung ist es daher die notwendige Verkehrssicherheit bei der Schaffung neuer Fahrradinfrastrukturen gewährleisten zu können. Untersuchungen im Rahmen der Mobilitäts- und Verkehrsforschung sind unverzichtbare Hilfsmittel, die wichtige Erkenntnisse zum Verhalten von Verkehrsteilnehmer und deren Interaktion untereinander liefern. Gleichwohl die Möglichkeit besteht, Studien zur Datenerhebung auf realen Straßen durchzuführen, haben Simulationsumgebungen den Vorteil, Fahrverhalten von Personen und dessen Erlebnisse in sicherer, kosteneffizienter und wiederholbarer Form zu dokumentieren. Der zunehmende Einsatz von Fahrsimulatoren lässt sich ebenfalls auf die stetigen Verbesserungen in der Elektronik sowie Computer- und Displaytechnologie zurückführen. Sie ermöglichen eine realitätsgerechte Darstellung der Fahrumgebung und stellen somit die Grundlage für valide Forschungsergebnisse dar.

Um die komplexen Vorgänge im Rahmen der Verkehrsinfrastruktur abbilden zu können, macht das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) ebenfalls von Simulatoren Gebrauch. Im Zusammenspiel mit Großforschungsanlagen und Laboren können im Institut für Verkehrssystemtechnik verschiedenartige Simulationsmodelle kombiniert werden. Mithilfe der adaptiven Verknüpfung des Systemportfolios können Datenerhebungen unter kritischen Verkehrsbedingungen realisiert werden (*DLR - Institut für Verkehrssystemtechnik - MoSAIC*, o. J.). Im MoSAIC (Modular and Scalable Application platform for ITS Components),

welches ein Baustein einer übergeordneten Laborarchitektur darstellt, werden Fragestellungen hinsichtlich des interaktiven Verhaltens zwischen unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern erforscht. Im Mittelpunkt des Laborkonzepts steht die Schaffung einer Multi-User-Simulation. Durch die Kopplung vorhandener Simulatoren können komplexe Testumgebungen simuliert werden, wodurch insbesondere kooperative Fahrassistentenfunktionen bereits vor Einsatz in Realumgebungen erprobt werden können. Derzeit befinden sich hierfür drei Auto-Fahrsimulatoren (auch als Sitzkiste bezeichnet), zwei Fußgängersimulatoren und ein Fahrradsimulator im Einsatz.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der technischen Weiterentwicklung des Fahrradsimulators. Hierbei richtet sich der Fokus auf die Modifizierung der für die Umsetzung längsdynamischer Kraftrückkopplung (Force-Feedback) zuständigen Subsysteme. Im Rahmen der bestehenden Simulationsumgebung sollen entsprechende Verbesserungsmaßnahmen nach einem definierten Anforderungsprofil identifiziert und umgesetzt werden. Die Systemimplementierung umfasst sowohl die hardware- als auch softwareseitige Überarbeitung der betroffenen Force-Feedback-Komponenten. Unter Berücksichtigung der theoretischen Grundlagen sollen folgende Optimierungen zur Verbesserung der Längsdynamikeigenschaften realisiert werden:

1. Genauigkeit der Geschwindigkeitserfassung erhöhen
2. Verzögerungswerte der Bremsanlage verbessern
3. Fahrtwindsimulation geschwindigkeitsabhängig gestalten

Die Konzeptüberarbeitung soll dazu beitragen eine Verbesserung der Fahreigenschaften und folglich eine Erhöhung der Simulationsgüte zu erzielen. Diese übergeordnete Fragestellung wird im Rahmen einer Probandenstudie anhand subjektiver Kriterien hinsichtlich Akzeptanz und Realitätsgrad beantwortet.

Wie in Abbildung 1 ersichtlich, baut diese Thesis auf den in Kapitel 2 diskutierten Grundlagen längsdynamischer Antriebs- sowie Widerstandskräfte bei Fahrrädern und dem Entwicklungsfortschritt bei Fahrsimulationsumgebungen auf. Mit Definition der Ausgangssituation und weiteren technischen Randbedingungen

erfolgt in Kapitel 3 die Festlegung der Anforderungen zur Weiterentwicklung längsdynamikbetreffender Simulator-Komponenten. Nach Erläuterung der soft- und hardwareseitigen Systemanpassungen erfolgt im weiteren Verlauf eine Analyse der Leistungssteigerung, welche den Abschluss des 3. Kapitels markiert. Kapitel 4 beschreibt die Durchführung einer Probandenstudie und bewertet die Ergebnisse hinsichtlich der gestellten Validierungsfrage und -hypothese. Abschließend dient der Schlussteil zur Interpretation sowie Zusammenfassung der Kernergebnisse dieser Arbeit und gibt einen Ausblick für zukünftige Arbeiten.

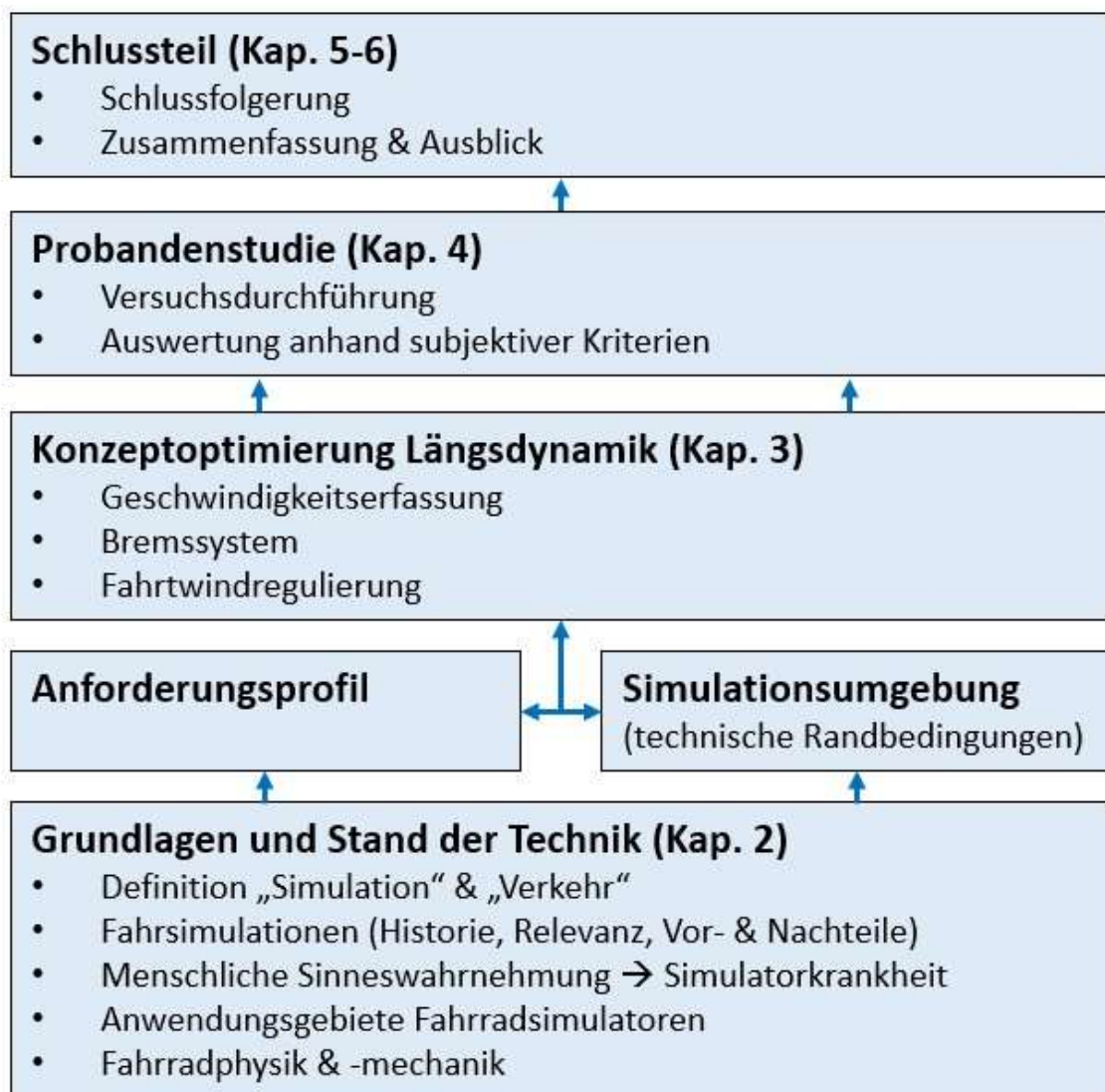


Abbildung 1: Struktur der Arbeit

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

Erste Untersuchungen im Rahmen einer Fahrsimulationsumgebung zur Beantwortung psychologischer Fragestellungen reichen zurück bis ins frühe 20. Jahrhundert (Barjonet, 2001, S. 14). Ein technischer Meilenstein, der die Konstruktion moderner (dynamischer) Flugzeug- sowie Fahrsimulatoren immer noch prägt, ist die von Gough entwickelte Bewegungsplattform, welche gemeinhin auch als Stewart/(Gough)-Plattform oder Hexapod bekannt ist (Stewart, 1966). Mit dem Fortschritt in der Automobilentwicklung, woraus ein verstärktes Verkehrsaufkommen ab den 60er Jahren resultiert, nahm die Relevanz von Studien mit verkehrspsychologischem Hintergrund zu. Dieser Trend ist bis heute zu beobachten, wobei sich der Fokus immer häufiger auf ungeschützte Verkehrsteilnehmer (VRU), wie Fußgänger und Fahrradfahrer, richtet.

Im folgenden Kapitel werden zunächst die Definitionen von Simulation und Verkehr bestimmt. Es folgt eine Betrachtung der historischen Entwicklung von Fahrsimulationen sowie eine Diskussion zu dessen Vor- und Nachteile. Im Rahmen der menschlichen Sinnesverarbeitung wird anschließend die Simulatorkrankheit näher beschrieben. Im weiteren Verlauf wird die Relevanz und Breite der Anwendungsgebiete von Fahrradsimulatoren aufgezeigt. Abschließend werden die zum Verständnis der längsdynamischen Eigenschaften notwendigen Grundlagen zur Fahrradphysik und -mechanik dargestellt.

### 2.1 Fahrsimulatoren mit verkehrstechnischem Bezug

*„Simulation ist das Nachbilden von Prozessen realer Systeme in einem Modell und das anschließende Durchführen von Experimenten an diesem Modell.“*  
(Sauerbier, 1999, S. 5)

Es gibt eine Reihe von Gründen aufgrund dessen eine Simulation eingesetzt wird, da eine Untersuchung des Realsystems entweder nicht möglich ist oder

nicht sinnvoll erscheint (Sauerbier, 1999, S. 5). Beispiele hierfür gibt es viele, wie etwa dass das reale System nicht (bzw. noch nicht) existiert (Fertigungsstraße). Weitere Ursachen, die eine Simulation notwendig machen können eine erhöhte Komplexität (Mikrochips) oder auch die Verfügbarkeit des eigentlichen Systems (Sternensystem) sein. Ebenfalls seien Motive mit finanziellen sowie ethisch bedenklichen Hintergrund zu erwähnen, aufgrund dessen eine Simulation einer Untersuchung des realen Systems vorgezogen wird.

Für ein besseres Grundverständnis wird zunächst der Frage nach dem Verkehr selbst nachgegangen. Welche Definition steckt hinter dem allgemeinen Begriff „Verkehr“ und wie erfolgt die Einordnung einzelner Verkehrsteilnehmer. Der Begriff Verkehr meint „[...] jegliche Form der Fortbewegung zwischen mehreren Punkten in unserem Alltagsleben“ (Moltenbrey, 2020, S. 3). Unabhängig vom jeweiligen Verkehrsmittel und Art der Fortbewegung unterscheidet man zwei große Typen von Verkehr. Auf der einen Seite erfolgt die Zuordnung all jener Verkehrsmittel, die nicht Einzelpersonen besitzen sondern der Allgemeinheit zur Verfügung steht und von Gruppen von Personen gemeinschaftlich genutzt wird (Moltenbrey, 2020, S. 3). Hierbei handelt es sich um den öffentlichen Verkehr und die Fortbewegung mittels Züge, Bussen, Trambahnen etc., auf der anderen Seite wird die (zumeist) nicht gemeinschaftliche Nutzung von im privaten Besitz stehenden Verkehrsmittel wie etwa PKW, LKW, Motorräder als Individualverkehr bezeichnet. Unterdessen der öffentliche Verkehr meist einer vorgegebenen Struktur folgt – z.B. Züge folgen ihren Gleisen und Busse ihren Routen –, sind die Bewegungen des Individualverkehrs vergleichsweise chaotisch und willkürlich. Um die vermeintlich unvorhersehbaren Bewegungen zu strukturieren und das Gesamtkonzept Verkehr besser erfassen zu können, sind Verkehrssimulationen für Verkehrsplaner unverzichtbar. Deshalb wurden im Zuge des steigenden Verkehrsaufkommens ab den 60er Jahren bereits Methoden bzw. Formeln entwickelt, um die Verhaltensweisen von Fahrzeuggruppen zu berechnen (Ashton, 1966, S. 10). Durch die Verbesserungen in den Bereichen Elektronik- und Computerentwicklung können heutige Simulationsprogramme digitale Nachbildungen von Verkehrsszenarien erschaffen.

Während Verkehrssimulationen vorrangig zur Planung und Verbesserung von Verkehrsanlagen eingesetzt werden, dienen Fahrsimulationen zur Untersuchung des menschlichen Fahrverhaltens. Sie werden als ein Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) definiert bei denen die Versuchspersonen in einer multisensorischen Umgebung die Bewegung eines virtuellen Fahrzeugs wahrnimmt und steuert (Kemeny & Panerai, 2003). Die Fahrer sollen sich innerhalb der Simulationsumgebung so verhalten, als würden sie ein reales Fahrzeug fahren. Während des Ersten Weltkriegs wurden die ersten Simulationen für die psychologische Untersuchung des Fahrens erstellt, um Reaktionen auf die akustische Wahrnehmung aufzuzeichnen (Barjonet, 2001, S. 14). Mit diesen Simulationen wurden im weiteren Verlauf hauptsächlich klassische Reaktionszeitexperimente nachgestellt. Seit den 1950er Jahren erfolgte verstärkt der Einsatz von Simulationen zur Untersuchung von Fragestellungen mit maritimen sowie luft- und raumfahrttechnischem Hintergrund. Bis in die 1970er Jahre wurden insgesamt 20 Simulatoren in Europa und Amerika gebaut und vor allem zu Ausbildungs- und Zulassungszwecken eingesetzt (Allen et al., 2011, S. 2–1 – 2.16). Heutige Simulationsumgebungen können sowohl visuelle Hinweise als auch Bewegungsreize erzeugen, die es Testpersonen ermöglichen, Bewegungen wahrzunehmen. Visuelle Stimuli werden durch Echtzeitbilder von simulierten Szenarien auf verschiedenen Arten von Displays (z.B. ein oder mehrere separate Bildschirme oder Head-Mounted Displays (HMD) sog. Virtual Reality (VR)-Brillen) wiedergegeben (Kemeny & Panerai, 2003, S. 67). Fahrsimulatoren können entweder statisch oder beweglich ausgelegt sein. Der Einsatz von Bewegungsplattformen zielt darauf ab, körperliche Bewegungen in der Simulation abzubilden und dadurch den Realitätsgrad in Fahrsimulationen zu erhöhen (Dziuda et al., 2014, S. 25).

Sowohl für die Forschung als auch in der Praxis sind Fahrsimulatoren von Bedeutung. Mit ihrer Hilfe kann das Fahrerverhalten in verschiedenen Verkehrsszenarien untersucht werden, um Rückschlüsse auf die zugrunde liegenden psychologischen Prozesse ziehen zu können. Hierbei werden Indikatoren zum Fahrverhalten, wie z.B. Geschwindigkeit oder auch Präzision sowie Notwendigkeit von Fahrmanövern ausgewertet (Castro, 2008, S. 22). Weitere Anwendungsfelder von Fahrsimulationen sind bspw. die Forschung über Verkehrssicherheit,

Fahrzeugauslegung, Einfluss eingeschränkter menschlicher Fähigkeiten auf den Fahrprozess sowie Ursachen und Folgen von Fahrerbeeinträchtigungen (Caird & Horrey, 2011, S. 5–3). In der Praxis dienen Simulatoren dazu, um Fähigkeiten, die zum Fahren benötigt werden, zu lernen und zu trainieren und werden zudem auch für die Freizeitgestaltung genutzt (Bertin et al., 2005, S. 1).

Untersuchungen mittels Simulatoren sind zeit- und kosteneffizienter als vergleichbare Versuche in der realen Verkehrsumgebung (Vollrath & Krems, 2011, S. 81). Sie bieten die Möglichkeit, dem Probanden innerhalb eines kurzen Testzeitraums eine genau zur Forschungsfrage passende Verkehrssituation zu präsentieren. Selbst kostengünstige Simulationsumgebungen, die nur eine geringe Realitätsnähe erreichen, haben das Potenzial, eine große Bandbreite von Forschungsfragen durch flexible Konfigurationen zu untersuchen (Caird & Horrey, 2011, S. 5–4). Letztendlich ist festzustellen, dass durch den Einsatz von Simulationen nur geringe Technologiekosten anfallen (Kemeny & Panerai, 2003, S. 31).

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Testpersonen in der simulierten Umgebung Situationen ausgesetzt werden können, die mit anderen Untersuchungsarten nicht abgebildet werden können, ohne dass die Gefahr besteht, dass die Probanden Schaden nehmen (Papelis & Ahmad, o. J., S. 65). Folglich sind Untersuchungen in Fahrsimulationen sicherer als Untersuchungen in realen Umgebungen. Zwar kann eine simulierte Umgebung nicht alle Risiken abbilden, die in einer realen Fahrumgebung auftreten können. Trotzdem rufen Simulationsszenarien ähnliche Emotionen wie reale Fahrsituationen hervor (Caird & Horrey, 2011, S. 54).

Verglichen mit anderen Vorgehensweisen zur Datenerhebung in der Verkehrspsychologie ist der größte Vorteil von Fahrsimulationen, dass bestimmte Verkehrssituationen entsprechend der gewünschten Forschungsmethodik variiert werden können (Vollrath & Krems, 2011, S. 33). Durch die vollständige Kontrolle über die Simulationsumgebung ist sichergestellt, dass Situationen, die gemäß der geforderten Fragestellung angepasst sind, erzeugt werden können (de Winter et al., 2012, S. 47). Ebenso können verschiedene Störgrößen wie Tageszeit, Verkehrsaufkommen sowie Art und Häufigkeit unerwarteter Verkehrereignisse

kontrolliert werden. Dies bietet den zusätzlichen Vorteil, dass die Verkehrsszenarien für jeden Probanden repliziert werden können, was es wiederum ermöglicht, die Versuchsergebnisse der einzelnen Versuchsteilnehmer miteinander vergleichen zu können.

Neben den genannten Vorteilen der Verwendung von Simulatoren gegenüber anderen Forschungsmethoden sollen im weiteren Verlauf auch die Nachteile diskutiert werden. Ein auffälliger Nachteil ist, dass die Fahrumgebung nie so realistisch simuliert werden kann wie das reale Original. Nach Vollrath und Krems (2011) können zum einen die Bewegungsdaten in Abhängigkeit der Simulator Qualität unvollständig, verfälscht oder gar fehlend sein. Zudem wirkt die Simulation oft simpel und eintönig und das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer ist nicht so realistisch und reaktiv wie im realen Straßenverkehr. Die Wahrnehmung dieser Unterschiede zur realen Verkehrsumgebung führt folglich zu einem veränderten Verhalten der Testperson in der simulierten Umgebung.

Außerdem haben die simulierten Verkehrssituationen, wie beispielsweise Verkehrsregelverstöße oder Unfälle, keine Auswirkungen in der Realität (Vollrath & Krems, 2011, S. 81). Im Bewusstsein darüber werden solche Situationen von den Probanden möglicherweise nicht mit der gleichen Ernsthaftigkeit erfasst wie in realen Fahrsituationen. Generell lässt sich beobachten, dass die wahrgenommene Realitätsnähe der Simulationsumgebung einen Einfluss auf das Fahrverhalten hat (Caird & Horrey, 2011, S. 52).

Außerdem gibt es weitere Einschränkungen, die für die experimentelle Forschung allgemeingültig sind und entsprechend bei Simulator Studien berücksichtigt werden müssen. Vollrath und Krems (2011) führen an, dass die Einflussgrößen, die für die jeweilige Untersuchungen als zentral angesehen werden, möglicherweise falsch oder irrelevant seien. Zudem weisen Caird und Horrey (2011) darauf hin, dass auch variable Störgrößen aus der realen Welt betrachtet werden müssen. Da einige dieser Einflussfaktoren in der Simulation nicht gänzlich rekonstruierbar sind, ist es den Autoren zufolge auch nicht möglich, den Zusammenhang zwischen dem Verhalten in der realen Fahrumgebung und dem daraus erhaltenen Feedback in der simulierten Umgebung vollständig nachzubilden.

Ebenso muss berücksichtigt werden, dass das Wissen der Testpersonen über das erwünschte Forschungsziel zu unnatürlichen Verhaltensweisen führt (Vollrath & Krems, 2011, S. 91).

Ein weiterer Nachteil, der beim Einsatz von Fahrsimulatoren genannt werden muss, ist das Hervorrufen negativer Nebeneffekte, wie beispielsweise die Simulatorkrankheit (Pausch et al., 1992, S. komplett). Diese Nebeneffekte verschlechtern die Messgenauigkeit, indem sie die Leistungsfähigkeit der Probanden herabsetzt. Dies kann zur Folge haben, dass die Trainingseffektivität sinkt und im äußersten Fall dazu führen, dass die Versuchsperson nicht mehr in der Lage ist die simulierte Fahraufgabe abzuschließen (Dziuda et al., 2014, S. 408).

## 2.2 Sinnesverarbeitung in der Simulation

Für die Weiterentwicklung einer Simulationsumgebung ist ein Verständnis der menschlichen Bewegungswahrnehmung, insbesondere der Beschleunigung eines Simulators erforderlich. Zur Wahrnehmung der Position und Bewegung im Raum, hat der Mensch vier verschiedene Erfassungssysteme:

1. Vestibuläres System: Bezeichnet die Wahrnehmung über das Gleichgewichtsorgan im Innenohr und dient zur Beschleunigungserfassung.
2. Visuelles System: Stellt die Wahrnehmung der Augen dar.
3. Auditives System: Beschreibt die Wahrnehmung des Gehörs.
4. Somatosensorisches System: Ist die Körperübergreifende Sinneswahrnehmung durch die Haut und den Bewegungsapparat.

Im Zentrum steht die Beantwortung der Frage, welche der zuvor genannten Wahrnehmungsprinzipien hauptverantwortlich zur Vermittlung von Beschleunigung und Geschwindigkeit sind. In den folgenden Unterabschnitten wird daher auf das vestibuläre sowie visuelle System eingegangen, welche die beiden wichtigsten Sinnesorgane zur entsprechenden Signalverarbeitung darstellen.

## 2.2.1 Vestibuläres System

Das vestibuläre System gilt bei der Nutzung von Fahrsimulationen als das Bedeutendste. Es sorgt für die Erfassung von Translations- und Rotationsbewegungen und stellt die Gleichgewichtsfunktion bereit, welches für das aufrechte Gehen unverzichtbar ist. Der Vestibularapparat (Abbildung 2), das gemeinhin als Gleichgewichtsorgan bezeichnet wird, besteht aus fünf Vestibularorganen, die sich jeweils im rechten und linken Innenohr des Menschen befinden (Schmidt & Schaible, 2006, S. 312–313). Hierbei übernehmen die zwei Maculaorgane die Erfassung der translatorischen Beschleunigung und die drei Bogengänge detektieren Rotationsbewegungen. Der Verbund mit der Cochlea, der Hörschnecke, stellt die Gesamteinheit dar. Eine kissenartige Masse, die Cupula, umschließt die in den Bogengängen befindlichen Sinneshärchen. Eine Rotationsbewegung bewirkt eine Verformung der Cupula, die eine entsprechende Informationsweitergabe im zentralen Nervensystem auslöst. Die Bogengänge sind senkrecht zueinander angeordnet. Hierdurch können Menschen Rotationen in alle Bewegungsrichtungen registrieren. Die Wirkungsweise der für die Translationsbewegung zuständigen Maculaorgane (Sacculus für vertikale und Utriculus für horizontale Bewegung) ist vergleichbar. Erfährt das vestibuläre System einen permanent konstanten Reiz so kann das Wahrnehmungsvermögen in eine Art Ruhezustand verfallen (Schmidt & Schaible, 2006, S. 186). Die Tatsache, dass die Gravitation die meiste Zeit nicht bemerkt wird, beschreibt diesen Vorgang und wird Adaption bezeichnet.

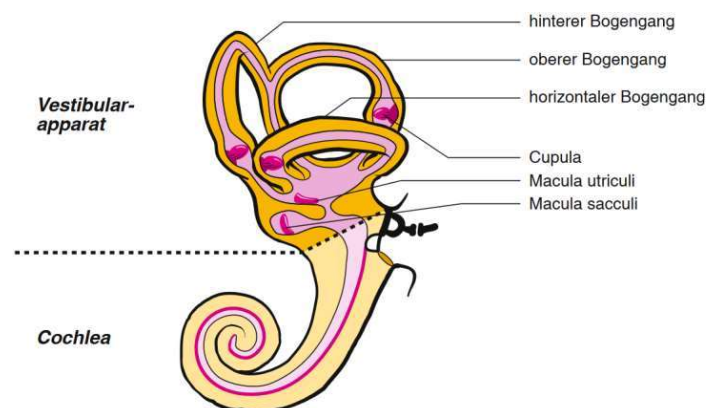


Abbildung 2: Bogengangsorgane und Maculaorgane des Innenohres

### 2.2.2 Visuelles System

Es ist jedoch ebenfalls möglich, allein durch visuelle Reize den Eindruck einer längs gerichteten Eigenbewegung zu vermitteln. Der als Vektion bezeichnete Effekt beschreibt die fälschliche Wahrnehmung einer Eigenbewegung, die ausschließlich durch das Beobachten einer bewegten Szene ausgelöst wird. Eine beispielhafte Situation ist das Beobachten eines anfahrenen Zugs aus einem stehenden Zug heraus. Häufig gewinnt man hierdurch den Eindruck, man selbst würde sich bewegen. Der sogenannte optischen Fluss ist ursächlich hierfür. Wenn sich der Wahrnehmende bewegt, beschreiben die Bildpunkte im Rahmen des peripheren Sehens einen Vektor im Laufe mehrerer Bildsequenzen. Vektorlänge und -richtung geben dabei Aufschluss über Geschwindigkeit und Richtung (Dörner et al., 2013, S. 45). Zwar steht die optische Wahrnehmung des anfahrenen Zuges im Konflikt mit der nicht wahrgenommenen vestibulären Stimulation, jedoch werden die visuellen Reize kurzzeitig stärker gewichtet. Hieraus lässt sich ableiten, dass visuelle Reize einen großen Einfluss auf die Bewegungseinschätzung haben und speziell zur Geschwindigkeitswahrnehmung beitragen. In Anbetracht dessen, dass die meisten Prozesse zur Wahrnehmung der Geschwindigkeitsvektoren vorrangig im peripheren Sichtfeld stattfinden, ist eine genügend hohe Sichtfeldabdeckung sicherzustellen. Bei vorgegebener Kopfhaltung besitzt der Mensch ein horizontales Sichtfeld von etwa  $170^\circ$ , welches durch Augenbewegung auf einen Bereich von  $200^\circ$  erweitert werden kann. Vertikal betrachtet erstreckt sich der menschliche Sichtbereich auf  $55^\circ$  oberhalb und  $80^\circ$  unterhalb der horizontalen Mitte.

### 2.2.3 Simulatorkrankheit

Ein Problem im Rahmen von Probandenstudien mit Fahrsimulatoren stellt die sogenannte Simulatorkrankheit dar. Sie ist häufig die Hauptursache für ein frühzeitiges Ausscheiden der Testpersonen. Der unerwünschte Nebeneffekt, der gerade bei statischen Simulatoren auftreten kann, ist eine Unterkategorie der

Bewegungskrankheit (Kinetose) (Kuiper et al., 2019, S. 82). Zur Kinetose werden weitere Varianten wie die See- und Landkrankheit sowie Luft- und Raumkrankheit gezählt. Sie entsteht vor allem durch das Ausbleiben vestibulärer Einflüsse während der gleichzeitigen Wahrnehmung von visuellen Reizen (visually induced motion sickness). Die Beschwerden sind einerseits vielfältig andererseits treten bei allen Probanden ähnliche Symptome auf. Sie machen sich häufig in Form von Blässe, Kopfschmerzen, Schwindel und Übelkeit bis hin zum Erbrechen bemerkbar. Die Theorie der sensorischen Umgestaltung von Reason liefert Begründungen für die Krankheit (Reason, 1978). Demzufolge sind Widersprüche im Rahmen der multisensorischen Informationsverarbeitung Ursachen für diese Art der Bewegungskrankheit. Maßgeblich sind dabei Konflikte zwischen der vestibulären und visuellen Wahrnehmung. Daraus lässt sich ein Zusammenhang mit der quantitativen Sichtfeldabdeckung ableiten. Zwar vermittelt eine erhöhte Abdeckung des Sichtfeldes durch den Effekt des optischen Flusses einen stärkeren Bewegungseindruck, jedoch steigert dies ebenfalls das Risiko für das Auftreten der Simulatorkrankheit. Untersuchungen bestätigen diesen Zusammenhang und belegen, dass die Tendenz zur Simulatorkrankheit mit einer größeren Sichtfeldabdeckung steigt (Lin et al., 2002). Weitere Studien zeigten einen Zusammenhang mit der Simulationsumgebung auf, wonach Kurvenfahrten im Vergleich zum Geradeausfahren eher das Potenzial besitzen Simulatorkrankheit hervorzurufen (Mourant et al., o. J., S. 1235). Ebenfalls können Simulationsdauer (Serge & Moss, 2015) und zeitlich versetzte Reizstimuli (Moss et al., 2011) Auswirkungen auf die Simulatorkrankheit haben. Zumeist wird der von Kennedy u.a. entwickelte Simulator-Sickness-Questionnaire (SSQ) zur Quantifizierung der Simulatorkrankheit genutzt (Kennedy et al., 1993). Anhand des Fragebogens kann das Befinden zu 16 Symptomen erfasst werden. Neben der Gesamtpunktzahl, die ein Maß für die generelle Simulatorkrankheit darstellt, können drei weitere Größen zum Unwohlsein (Okulomotorik, Desorientierung und Übelkeit) ausgewertet werden.

## 2.3 Fahrradsimulatoren

In Anbetracht der jährlichen Verkaufszahlen von Fahrrädern und insbesondere dem erhöhten Anstieg an E-Bikes und Leihfahrrädern auf den Straßen ist ein besseres Verständnis des Fahrradverhaltens zur Erhöhung der Fahrradsicherheit unerlässlich. Einige neue Studien (z. B. Kováčsová et al., 2016; Moore et al., 2010) haben eine experimentelle Datenerhebung während des natürlichen Fahrens durchgeführt. Angesichts dessen, dass das Fahrrad ein seitlich instabiles Fahrzeug darstellt und der Fahrer, die meiste Zeit das Gleichgewicht kontrollieren muss, ist die Untersuchung an diesem Realsystem für den Fahrer sehr gefährlich. Zudem sind Radfahrer aufgrund des nicht vorhandenen Aufprallschutzes einem erhöhten Verletzungsrisiko ausgesetzt (Dialynas et al., 2019, S. 1). Daher ist, wie bei Simulatoren für andere Verkehrsmittel, die Schaffung einer sicheren Testumgebung eines der Hauptbeweggründe für die Entwicklung von Fahrradsimulatoren. Da sie reproduzierbare Experimente und den Vergleich zwischen einer Vielzahl von Fahrern ermöglichen wurden bereits eine Reihe Fahrradsimulatoren für verschiedenste Forschungsziele entwickelt. Zwar werden, gegenüber dem Automobilbereich, vergleichsweise noch relativ wenig Untersuchungen durchgeführt, aber mit der wachsenden Beliebtheit des Fahrrads als nachhaltiges Verkehrsmittel steigt die Relevanz von Fahrradsimulatoren für Forschung und Entwicklung. Zudem ermöglichte die Verbreitung und Weiterentwicklung von Simulationssoftware (bspw. Unreal-Engine) die Simulation von immer realistischeren Verkehrsumgebungen. Fahrradsimulatoren können daher für ein breites Anwendungsspektrum dienen. Sie werden bei Untersuchungen von verkehrstechnischen Forschungsfragen, beispielsweise der Interaktionen zwischen Rad- und Autofahrern, eingesetzt und sind Hilfsmittel bei der Planung von neuen Verkehrsanlagen (Yin & Yin, 2007, S. 160). Zudem können sie zur Erstellung neuer Fahrradkonzepte dienen oder werden als Freizeit- bzw. Sportgerät genutzt. Eine Übersicht der verschiedensten Forschungsanwendungen wird im folgenden Kapitel aufgezeigt.

### **2.3.1 Anwendungsgebiete**

Anhand einer diesjährig erschienenen Veröffentlichung des Journal of Science & Cycling werden im Folgenden eine Reihe unterschiedlicher Forschungshintergründe rund um Fahrradsimulatoren aufgezeigt. Diese wertet 83 Studien mit Fahrradsimulatoren aus und ordnet diese nach ihrem jeweiligen Untersuchungszweck ein (Ansariyar et al., 2022).

#### **Kategorie 1: Simulatoren zur Entwicklung von Fahrrad-Dynamikmodellen**

Ein Hauptaugenmerk bei diesen Studien gilt der Entwicklung eines Simulators, der mittels virtueller Fahrumgebung die Simulation von realen Situationen erleichtert. Vorrangig zu Untersuchungszwecken in einer Laborumgebung wurden verschiedene Fahrrad-Prototypen mithilfe einer systematischen Konzepterstellung entwickelt. Das entsprechende Dynamikmodell wurde unter Verwendung mathematischer Gleichungen für die Fahrradstabilität aufgestellt. Gleichzeitig wurden Methoden zur Datenerfassung, Analyse, Modellierung und Simulation von Leistungsparametern eines Fahrradsimulators entwickelt oder bewertet.

#### **Kategorie 2: Simulatoren mit Fokus auf VR-Anwendungen**

Im Zentrum dieser Forschungsvorhaben steht die Integration von VR-Anwendungen in die Simulationsumgebung. Mit der Zielvorgabe die Validität der Versuchsergebnisse zu erhöhen wurde der Einfluss der VR-Technologie auf den Realitätsgrad der Simulation untersucht. Im Rahmen dieser Studienkategorie wurden von den Forschern weitestgehend HMDs eingesetzt.

#### **Kategorie 3: Unfallforschung mit Fahrradsimulatoren**

Eine wesentliche Anwendung von Fahrradsimulatoren sind Studien zur Sicherheitsförderung. Bei diesen Studien haben Forscher das Zusammenspiel von Radfahren mit anderen Verkehrsteilnehmern und sicherheitsfördernde Maßnahmen in Abhängigkeit von Gefahrensituationen für Radfahrer untersucht. Mithilfe der Simulationsumgebung lassen sich die Verhaltensweisen von Radfahrern und Sicherheitskonzepte im Rahmen der Interaktion mit der Verkehrssituation und

anderen Fahrzeugtypen beurteilen. Zudem wurde in diesen Studien oftmals der Einfluss des Radfahrers für das Zustandekommen von Unfällen beleuchtet.

#### **Kategorie 4: Weiterführende Forschungsgebiete**

In dieser übergeordneten Studien-Rubrik sind die breit gefächerten Forschungsgebiete bei denen Fahrradsimulatoren zum Einsatz kommen zusammengefasst. Angefangen beim Verkehrsingenieurwesen über Bereiche wie Medizin-, Psychologie- und Sportwissenschaften bis hin zur Raumfahrttechnik stehen Fahrradsimulatoren im Mittelpunkt von Forschungsvorhaben.

## **2.4 Fahrradphysik und -mechanik**

Dieses Kapitel widmet sich der grundsätzlichen Fahrrad-Fahrmechanik hinsichtlich der längsdynamischen Kraftreaktionen beim Beschleunigungsvorgang. Darüber hinaus werden die Hauptkategorien bei Fahrradbremsen aufgezeigt und die Wirkungsweise sowie Einsatzgebiete der gängigsten Bremssysteme beleuchtet.

### **2.4.1 Krafteinwirkung am Fahrrad**

Anhand des Wechselwirkungsprinzips, wonach ein Körper, der eine Kraft eines anderen Körpers erfährt, eine Reaktionskraft auf diesen ausübt, lässt sich die Kraftwirkung beim Fahrrad erläutern. Beim Blick auf das in Abbildung 3 (angelehnt an Artmann et al., 2019, S. 455–456) dargestellte System wird eine Antriebskraft  $F$  vom Fahrer auf das Hinterrad im Punkt  $A$  eingeleitet. Da diese Kraft allerdings der Fahrtrichtung entgegenwirkt, bedarf es einer Gegenkraft, um die gewünschte Vorwärtsbewegung zu erzielen. Erst der Rollwiderstand am Hinterrad  $F_{RH}$ , der die erforderliche Reaktionskraft  $F_A$  darstellt, sorgt dafür, dass das System sich in Folge der Antriebskraft, gleichbedeutend mit der Aktionskraft, in Bewegung setzt. Da bei statischer Betrachtung ein Kräftegleichgewicht vorliegt, wird bei den angrenzenden Komponenten (Reifen und Fahrbahn) eine

Deformation erzeugt. Im Falle der dynamischen Wechselwirkung von Kräften sorgen (in Folge, dass kein Gleichgewicht vorhanden ist) Überschusskräfte (Formel (1)) entweder für eine Beschleunigung oder Verzögerung des Radfahrers.

$$F' = m \cdot a \quad (1)$$

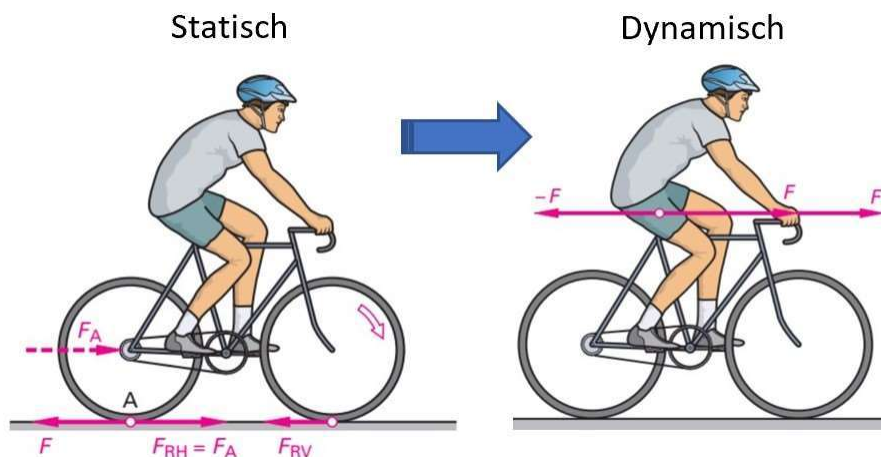


Abbildung 3: Krafteinwirkung am Fahrrad

## 2.4.2 Bauarten von Bremsen

Fahrradbremsen werden grundsätzlich danach unterschieden, an welcher Position die Krafteinleitung erfolgt. Eine weitere Separierung wird durch die Art der Ansteuerung, ob mechanisch mittels Bremsseil oder hydraulisch, bestimmt. Für das Aufbringen der erforderlichen Brems- und Reibkräfte sorgen vor allem Felgenbremsen, allerdings werden auch Nabenbremsen häufig genutzt. Im Folgenden werden jeweils zwei stellvertretende Beispiele für diese Kategorien angeführt.

### Seitenzugbremsen:

Bei dieser Art der Felgenbremse werden die vom Bremshebel eingeleiteten Kräfte nur auf einen der beiden Bremsarme übertragen. Die formschlüssige Verbindung verursacht infolge der Aufwärtsbewegung eine Gegenreaktion auf den jeweils anderen Bremsarm, sodass dieser ebenfalls mitgenommen wird und

beide Bremsschuhe auf die Felgenflanken drücken. Im Vergleich zur einfach gelagerten Variante ermöglicht die zweifach gelagerte Bauweise aufgrund besserer Hebelverhältnisse höhere Bremskräfte (Abbildung 4) (Breuer & Bill, 2012, S. 264). Aufgrund der gewichtssparenden Bauweise wird die hochentwickelte Doppelgelenktechnik auch im Rennradsport verwendet.



Abbildung 4: Rennrad-Seitenzugbremse

### **V-Bremse:**

Diese Felgenbremse wird zur Kategorie der Mittelzugbremsen gezählt, da sie nach ähnlichen Wirkungsprinzip arbeitet. Größter Unterschied bei der V-Bremse (Abbildung 5) (Breuer & Bill, 2012, S. 264) ist der Einsatz eines stabilen Metallröhrchens, welches als Zugumlenkung des Bremsseils fungiert. Damit beim Ziehen des Bremshebels beide Bremsschuhe zusammengezogen werden, ist das Röhrchen an einem der beiden Bremsarmen fixiert. Durch die verbesserten Hebelverhältnisse erzeugt sie innerhalb der Mittelzugbremsen die höchsten Bremskräfte, weshalb sie in den allermeisten Fahrradklassen vertreten ist.



Abbildung 5: V-Bremse

**Trommelbremse:**

Trommelbremsen sind zumeist in der Vorderradnabe integriert (Abbildung 6) (Artmann et al., 2019, S. 391). Die mechanische Ansteuerung erfolgt von Hand über ein Bremsseil. Bei Betätigung erfolgt ein Auseinanderdrücken der inneren Bremsbacken, was die umlaufende Bremstrommel verzögern lässt. Eine Ausnahme ist die Rücktrittbremse, welche die kleinste und älteste Trommelbremse darstellt. Sie wird auch als Freilauf-Bremsnabe definiert und wurde im Jahr 1903 von Ernst Sachs unter dem Namen *Torpedo* erfunden (Schriftleitung des „Aufstiegs“, 1964, S. 93). Trommelbremsen findet man häufig an Hollandrädern und vielen Citybikes.



Abbildung 6: Vorderrad Trommelbremse

**Scheibenbremse:**

Bei Scheibenbremsen (Abbildung 7) (Breuer & Bill, 2012, S. 268) ist die Bremscheibe durch spezielle Aufnahmesysteme (häufig 6-Loch-Flanschverbindung oder Passverzahnung) an der Fahrradnabe montiert. Die Montage-Standards bestimmen ebenfalls die Befestigungsweise des Bremssattels an der vorderen Gabel bzw. am hinteren Teil des Fahrradrahmens. Aufgrund des geringeren Durchmessers der Bremscheibe sind höhere Anpresskräfte erforderlich, um gegenüber der Felgenbremse vergleichbare Verzögerungen erzielen zu können. Vor allem hydraulisch angesteuerte Scheibenbremsen besitzen einen hohen Wirkungsgrad wodurch sie mit geringen Handkräften bedienbar und leicht zu dosieren sind (Artmann et al., 2019, S. 397). Verglichen mit Felgenbremsen erreichen

sie auch unter Nässe und Schmutzeinfluss annähernd gleiche Verzögerungswerte. Zudem kommt es bei hohen Beanspruchungen zu keinem Überhitzen der Felgen, was vor allem bei Mountainbikes und E-Bikes von Vorteil ist.



Abbildung 7: Scheibenbremse

## 3 Analyse und Konzeptoptimierung der Längsdynamik

Dieses Kapitel behandelt die auf einer Analyse aufbauende Weiterentwicklung des Fahrradsimulators, der DLR-intern auch als BikeSim bezeichnet wird (). Im Mittelpunkt dieser Konzeptüberarbeitung stehen Fahr- und Simulations-eigenschaften, die zur Wahrnehmung der längsdynamischen Krafteinwirkungen sorgen. Hierfür erfolgt nach einer Betrachtung der gesamten BikeSim-Testumgebung eine nähere Betrachtung der bestehenden Force-Feedback-Architektur. In Verbindung mit den gegebenen Randbedingungen werden im Anschluss maßgebliche Anforderungen zur Modifizierung der Längsdynamik definiert. Darauf aufbauend erfolgt die Entwicklung der Lösungsentwürfe und eine Beschreibung der Soft- und Hardware betreffenden Konzeptumsetzungen. Zur Nachweislichkeit der Leistungssteigerungen schließt das Kapitel mit einer Auswertung in Form eines Konzeptvergleichs auf theoretischer Ebene ab.

### 3.1 Subsysteme der BikeSim-Simulationsumgebung



Abbildung 8: BikeSim-Simulationsumgebung

Eine häufig angewandte Klassifizierung von Simulatoren erfolgt in statische und dynamische Systeme. Da der Fahrradsimulator (Abbildung 8) mithilfe seines **Bewegungssystems** Beschleunigungen simulieren kann, wird er als dynamischer Simulator eingestuft. Für die Umsetzung der längs- und quer gerichteten Bewegungen sorgt eine Bewegungsplattform mit zwei Freiheitsgraden.

Mittels einer Aluminiumkonstruktion fest auf der Plattform montiert, stellt das Fahrrad in Kombination mit den Krafrückkopplungssystemen die zentrale **MMS** des Simulators dar. Zur Fixierung und Einbindung der Force-Feedback-Einheiten wurden lediglich die Räder und Gabel demontiert. Eines der Force-Feedback-Komponenten ist der Servomotor zur Nachbildung des Lenkwiderstands. Durch eine direkte Kopplung mit dem Lenker entsteht ein haptisches Lenksystem, welches in Verbindung mit dem Dynamikmodell ein Lenkwinkelabhängiges Widerstandsmoment bereitstellt. Zur Erzeugung des Tretwiderstands wird ein Fahrrad-Rollentrainer verwendet. Die Übertragung der Pedalkraft erfolgt durch den ursprünglichen Kettenantrieb des Fahrrads, welches mit dem vormontierten Zahnkranzpaket des Rollentrainers verbunden ist. In Folge der Pedalbetätigung wird im Inneren des Rollentrainers ein Schwungrad angetrieben, welches in Verbindung mit einer Wirbelstrombremse ein einstellbares Widerstandsmoment am Hinterrad erzeugt. Zur Simulation der Bremskraft sind zwei S-förmige Zugkraft-Wägezellen in das Bremssystem des Fahrrads integriert. Hierdurch wird erwartet, das gleiche Bremsgefühl wie bei einem realen Fahrrad hervorrufen zu können. Darüber hinaus wird eine modifizierte Fahrradbremse zur realen Verlangsamung des Rollentrainers verwendet. Um ebenfalls die Simulation des Fahrtwinds zu ermöglichen, kommt ein weiteres Force-Feedback-Teilsystem in Form eines Bodenventilators zum Einsatz.

Das **Sichtsystem**, welches durch Darstellung einer VR visuelle Reize erzeugt, ist auf zwei verschiedene Arten realisiert. Eine Möglichkeit zur Visualisierung der Fahrumgebung ist die Übertragung auf einem einzelnen Monitor und eine Weitere ist die Verwendung eines HMD. Durch das Zusammenspiel der internen sowie externen Sensorik kann die Position und Ausrichtung der VR-Brille im Raum erfasst werden. Im Gegensatz zum Monitor ist es somit möglich, einen von der

Fahrtrichtung unabhängigen 360°-Blickwinkel einnehmen zu können. Um die Echtzeit-Visualisierung in Kombination mit dem HMD noch realitätsnaher zu gestalten, werden VR-Handschuhe eingesetzt. Diese ermöglichen die Positionserfassung der Hände des Fahrers, sodass deren Bewegungen in VR sichtbar sind.

Die **Datenbasis** ist die im Hintergrund laufende Software und dient zur Verarbeitung von Eingabedaten, welche seitens der Probanden über die Steuerungselemente des Fahrrads und seitens der Versuchsleitung am Rechner-Leitstand erzeugt werden. Durch die Verknüpfung der wesentlichen Softwarekomponenten wie Hardwarekommunikation, Simulator Steuerung und Modellsimulation wird eine Echtzeit-Synchronisation zwischen den Hardware-Daten und der VR-Visualisierung sichergestellt. Mit der Unreal-Engine wird ein leistungsstarkes Spieleentwicklungs-Framework genutzt, um eine realitätsgetreue Fahrumgebung darzustellen. Die Softwareumgebung kann folglich als Bindeglied zwischen den zuvor genannten Subsystemen MMS, Sicht- und Bewegungssystem verstanden werden. Die richtige Feinabstimmung dieses Verbunds trägt maßgeblich zur Schaffung eines hoch immersiven Fahrerlebnisses bei.

## **3.2 Ausgangszustand Rollentrainer**

Im ursprünglichen Zustand des BikeSim wurde festgestellt, dass vor allem Beschleunigungsvorgänge nur fehlerbehaftet visualisiert werden können. Eine verzögerte Bildverarbeitung sorgte dafür, dass die wahrzunehmende Fortbewegung beim Anfahren und Abbremsen ruckartig dargestellt wurde. Dies ließ eine Problematik bei der Geschwindigkeitsmessung vermuten, was ausschlaggebend war, die vorhandene Messeinrichtung näher zu beleuchten. Diese beruht auf die Verwendung des Rollentrainers *Tacx® FLUX 2 Smart-Trainer* der Firma Garmin (siehe Anhang A - Tacx® FLUX 2 Smart-Trainer) (Garmin & subsidiaries, o. J.). Im Folgenden wird auf die Analyse der verwendeten Datenübertragungstechnik und des vorliegenden Messprinzips eingegangen, welche zur Identifizierung von Verbesserungsmöglichkeiten durchgeführt wurde.

### 3.2.1 Informationsübertragung

Der sogenannte Smart-Trainer besitzt integrierte Schnittstellen zur drahtlosen Datenübertragung. Ab Werk verfügt der Rollentrainer über die Funknetzstandards BLUETOOTH Low Energy (BLE) sowie über das von einer Tochterfirma von Garmin entwickelte ANT+ (*The Wireless Sensor Network Solution - THIS IS ANT*, o. J.). Im Rahmen des Indoor-Fahrradtrainings werden diese üblicherweise zur Datenübermittlung von Trainingsdaten an andere kompatible Geräte, wie beispielsweise Fitness-Tracker, genutzt. Hierdurch können Sensordaten zu Fahrgeschwindigkeit, Trittfrequenz und Leistungsgrad bereitgestellt werden. Die Datenbasis der Simulationsumgebung nutzt zur Verarbeitung der Fahrgeschwindigkeit die BLE-Schnittstelle. Die Vernetzung wird mithilfe eines entsprechenden Kommunikationskanals realisiert, der den Austausch von Datenpaketen zwischen Rechner-Leitstand und Rollentrainer ermöglicht. Die Geschwindigkeitsinformationen werden anschließend im Dynamikmodell verarbeitet und in der Simulation wiedergegeben. Da sich die Bluetooth-LE-Technologie -wie der Name bereits vermuten lässt- vor allem durch einen geringen Stromverbrauch auszeichnet, ist dies gleichermaßen mit einer geringen Sendeleistung sowie einer kleinen Übertragungsrate verbunden. Abbildung 9 zeigt eine Übersicht der Übertragungsraten und Reichweiten von gängigen Funkstandards (Gupta, 2016, S. 3). Demnach erreicht BLE nur eine geringe Geschwindigkeit zur Datenübermittlung, die in einem Bereich von lediglich einigen 100 Kbps liegt.

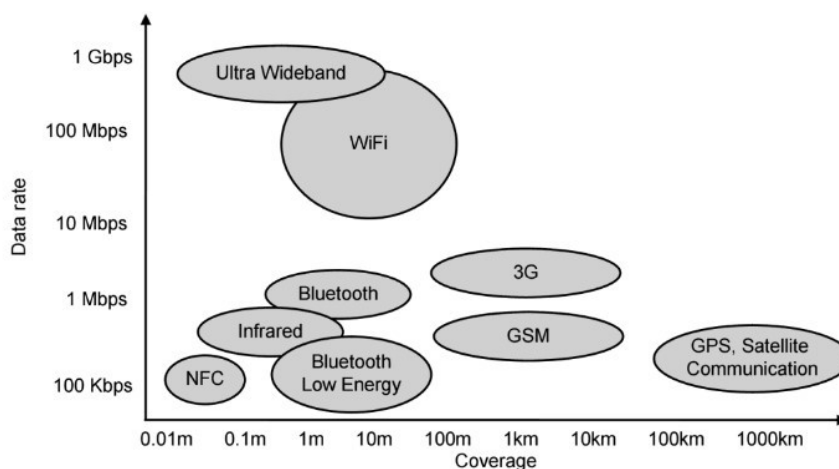


Abbildung 9: Überblick der Datenübertragungsraten & Reichweiten gängiger Funknetzstandards

### 3.2.2 Messverfahren

Nach Zerlegung und Untersuchung des Rollentrainers wurde festgestellt, dass die interne Messeinrichtung auf Basis einer Gabel-Lichtschanke (OMRON SX-1041; siehe Abbildung 10) arbeitet.

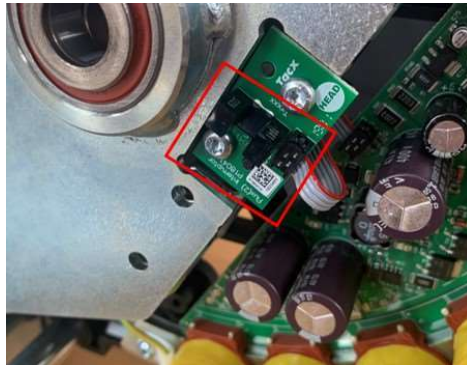


Abbildung 10: Gabel-Lichtschanke des Rollentrainers

Als Maßverkörperung ist am Schwungrad ein konzentrisch positioniertes Geberrad verschraubt. Dieses besitzt rechtwinklig abgewinkelte Zähne, die bei Rotation des Schwungrads den Gabelspalt des Sensorelements durchqueren. Sie lösen während einer Drehbewegung entsprechende Schaltvorgänge im Fototransistor aus. Die Impulsanzahl in einem bestimmten Zeitintervall gibt Aufschluss über die Drehgeschwindigkeit, welche von der internen Elektronik erfasst und weiterverarbeitet wird. Anhand des in Abbildung 11 gezeigten Geberrads, kann die Auflösung der Messeinrichtung ermittelt werden. Entsprechend der Anzahl der Zähne beträgt diese 12 Impulse pro Umdrehung (Pulse Per Rotation) (PPR), was folglich einer minimalen Schrittweite von  $30^\circ$  entspricht.



Abbildung 11: Geberrad am Schwungrad

### 3.3 Ausgangszustand Bremsen

Das Bremssystem des Simulator-Fahrrads beruhte in der ursprünglichen Konzeptausslegung auf zwei verschiedene Funktionsprinzipien. Zum einen wurden zwei Zugkraft-Wägezellen (S-Wägezellen) in das mechanische Bremssystem integriert. Die Kraftmessung der über die Bremshebel eingeleiteten Zugkräfte sollte dazu dienen, eine entsprechende Verzögerung der Fahrgeschwindigkeit in der Simulation darzustellen. Um ebenfalls eine reale Verlangsamung des Rollentainers erzielen zu können, wurde die Bremsanlage mit einer Felgenbremse erweitert. Hierbei wurde auf die V-Bremse des ursprünglichen Fahrrads zurückgegriffen. Wie in Abbildung 12 abgebildet, wurde dazu ein einzelner Bremsarm verwendet und auf einer zusätzlichen Hilfskonstruktion montiert. Die modifizierte Bremsanlage ist in unmittelbarer Nähe des Rollentainers positioniert, sodass der Bremschuh auf der Außenseite des Schwungrads die gewünschte Anpresskraft erzeugt.



Abbildung 12: Ausgangszustand Bremsanlage

### 3.4 Ausgangszustand Fahrtwindsimulation

Ein weiteres Force-Feedback-Modul stellt der Fahrtwind-Simulator in Form eines Bodenventilators dar. Hierbei handelt es sich ebenfalls um ein Freizeitprodukt zum Indoor-Radfahren. Mit dem *KickR Headwind* (siehe Anhang A - KickR Headwind) der Firma Wahoo wurde die Stärke des Fahrtwinds mithilfe der vier manuell einstellbaren Ventilatorgeschwindigkeiten gesteuert (*KICKR HEADWIND Smart-Ventilator für Radsport*, o. J.). Der erzeugte Luftstrom soll den Komfort erhöhen, indem er die Schweißentwicklung während des Fahrens mindert. Dies kann ebenfalls dazu beitragen, die Tendenz zur Simulatorkrankheit zu verringern.

### 3.5 Anforderungsprofil

Als übergeordnete Zielsetzung besteht das Bestreben, die Simulationsgüte der Testumgebung zu steigern. Um dies zu erreichen, müssen die Reiz- und Steuerungsschnittstellen (Force-Feedback-Module) sowie die Echtzeit-Simulation des Fahrrads eine entsprechende Leistungsfähigkeit besitzen. Nach Untersuchung der bestehenden BikeSim-Auslegung konnten folgende verbesserungswürdige Leistungsmerkmale der Teilsysteme zur Längsdynamik festgestellt werden.

Fehlerursachen für die ruckartige Visualisierung von Beschleunigungen lassen sich an der Verwendung des Rolltrainers ableiten. Wesentliche Schwachstellen sind zum einen die geringe Auflösung der Messeinrichtung zur Geschwindigkeitserfassung. Zum anderen können mit den vorhandenen Funknetzstandards des Smart-Trainers nur relativ geringe Geschwindigkeiten der Datenübertragung erreicht werden.

Darüber hinaus wurde ein Optimierungspotenzial in der Ausführung des bestehenden Bremssystems erkannt. Sowohl die Tatsache, dass die effektive Bremskraft nur an einem Bremshebel eingeleitet werden kann, als auch eine niedrige Verzögerungsleistung der Bremsanlage haben störenden Einfluss auf das

Simulationsempfinden. Im Ausgangszustand des Bremssystems ist eine modifizierte V-Bremse installiert. Innerhalb der Felgenbremsen können mit dieser Bauweise (bedingt durch die günstigen Hebelverhältnisse) die höchsten Bremskräfte erzeugt werden. Aufgrund der Bauform des Rollentrainers können die erforderlichen Anpresskräfte jedoch nur auf der Außenseite des Schwungrads aufgebracht werden. Dies verhindert die Montagemöglichkeit des zweiten Bremsarms und hat zur Folge, dass das Schwungrad im Gegensatz zu Fahrradfelgen nicht beidseitig umfasst werden kann.

Ein weiteres mit der Realitätstreue eng verknüpftes Qualitätsmerkmal ist die Simulation des Fahrtwinds. Im Rahmen der ursprünglichen Verwendung des Bodenventilators wurde dieser ausschließlich über seine vier manuell einstellbaren Leistungsstufen angesteuert. Da der Fahrtwind in Realität nicht statisch, sondern sich mit der Fahrgeschwindigkeit ändert, ist, soll die Steuerung des Ventilatorluftstroms von der erfassten Geschwindigkeit beeinflusst werden können.

Unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen und Festlegung der Verbesserungskriterien erfolgt die Definition der in Tabelle 1 dargestellten Fest- (F), Mindest- (M) und Wunschanforderungen (W).

Tabelle 1: Anforderungsliste

<b>Geschwindigkeitsmessung</b>	<b>Anforderung</b>
Auflösung des Messverfahrens zur Geschwindigkeitserfassung erhöhen: mind. 360 PPR	F
Messung eines niedrigen Drehzahlbereich ermöglichen: 0-1800 1/min	F
Beibehaltung der vorherigen Messeinrichtung im Rollentrainer	W
Kompatibilität der Übertragungsschnittstelle mit Datenbasis	F
Geringe Störanfälligkeit bei mechanischer Belastung (Schwenkbewegung von Bewegungsplattform, Vibrationen & Toleranzen des Rollentrainers)	M
Bewegungsraum der Motion-Plattform hinsichtlich Kollision mit statischer Umgebungsplattform berücksichtigen	F

<b>Bremssystem</b>	
Bremsvorgang soll mittels zwei Bremshebel eingeleitet werden können	F
Weiternutzung des Rollentrainers zur Widerstandserzeugung ermöglichen	F
<b>Fahrtwind</b>	
Beibehaltung des vorhanden KickR Headwind	F
Ansteuerung durch Datenbasis des BikeSim ermöglichen	W

### 3.6 Konzeptoptimierung Geschwindigkeitsmessung & Bremssystem

Die Modifikation der Bremseinheit sowie der Messeinrichtung zur Geschwindigkeitserfassung richtet sich nach dem erarbeiteten Anforderungsprofil, wodurch die zuvor ermittelten Problemursachen und die Randbedingungen der Simulationsumgebung berücksichtigt werden. Die folgenden Kapitel beschreiben die Überarbeitungsschritte zur Leistungssteigerung der einzelnen Untersysteme.

#### 3.6.1 Konzeptfindung Geschwindigkeitsmessung

Ausgehend vom Anforderungsprofil (Kapitel 3.5) kommen zwei mögliche Stellen am BikeSim in Frage, an denen Kenngrößen zur Bestimmung der Fahrgeschwindigkeit gemessen werden können. Eine Möglichkeit besteht in der Drehbewegungsmessung der Kurbelwelle des Kurbelantriebs. Eine weitere Variante stellt die Ermittlung der Schwungradgeschwindigkeit des Rollentrainers dar. Nach einer im nächsten Schritt durchgeführten Recherche kristallisierten sich drei Grundprinzipien zur Messwerterfassung heraus, auf die im weiteren Verlauf näher eingegangen wird.

### **Sensorisches Innenlager**

Dieses Messverfahren wertet die Pedalbewegungen des Fahrers aus. Der spezielle Kurbelsatz verfügt über magnetoelastischer Sensorik (Magnetostriktion) zur Torsionsmessung und einen Hallsensor zur Winkelmessung. Hierdurch können u.a. die infolge der Pedalkräfte entstehenden Drehmomente an der Kurbelwelle quantifiziert werden. Darüber hinaus können mithilfe des Winkelsensors Drehzahl sowie Drehwinkel erfasst werden, wodurch dieses Bauteil zunächst als eine mögliche Lösungsvariante angesehen wurde. Der Vorteil hinsichtlich eines geringen Montageaufwands und die Tatsache, dass das Bauteil bereits im E-Bike- und S-Pedelec-Sektor eingesetzt wird, erschienen ebenfalls gute Voraussetzungen für die Verwendung im Simulator-Fahrrad. Nach Bewertung der technischen Leistungsmerkmale wurde jedoch eine zu niedrige Auflösung festgestellt. Da diese mit 32 Impulsen/Umdrehungen angegeben wird (siehe Anhang A – Sensor S-BB-RT) und dadurch weit unter dem Wert der Festanforderung (min. 360 PPR) liegt, musste diese Konzeptidee verworfen werden.

### **Magnetfeldsensoren & Zahnrad**

Ein anderer Ansatz, wobei hier die Drehbewegung des Rollentrainer-Schwungrads im Mittelpunkt der Messung steht, beschreibt das Messverfahren mittels magnetempfindlicher Sensoren. Im Bereich der Automatisierungstechnik wird beim Einsatz von Magnetfeldsensorik im Wesentlichen auf Hallsensoren und magneto-resistive Sensoren zurückgegriffen (Schnell, 1993, S. 102). Sie werden u.a. zur Bestimmung von Abständen oder als Zähler in Form von Näherungsschalter eingesetzt. Letzteres erfordert ein zusätzliches Messzahnrad oder bereits vorhandene Konstruktionselemente als Maßverkörperung. Durch das Abtasten des rotierenden Zahnkranzes werden infolge von Magnetfeldänderungen Spannungssignale ausgewertet. Um ein hochauflösendes Ausgangssignal (Einheit pulse per rotation PPR) zu erhalten, wird von vielen Herstellern eine integrierte Interpolationselektronik angeboten. Zur Integration der Messeinheit hätte sowohl eine Verlängerung der Schwungradwelle als auch die Schaffung einer Befestigungsmöglichkeit des Geberkopfes erfordert. Hierbei ist ein vorgegebener Luftspalt zwischen Geber und Zahnrad zu beachten. Bei den favorisierten

Sensoriken ist ein Nennabstand von lediglich 0,1 mm bis 0,3 mm zu berücksichtigen (siehe Anhang A - VS-Sensorik RGM2G-D) (VS Sensorik GmbH, o. J.). Jedoch sind aufgrund der teilweise ruckartigen Schwenkvorgänge der Bewegungsplattform vergleichsweise hohe Relativbewegungen der Rollentrainer-Welle in Radialrichtung zu erwarten. Dies hätte eine Zentrierung und Abstützung in Form einer zusätzlichen Wellenlagerung erforderlich gemacht.

### **Drehgeber**

Drehgeber können Drehbewegungen durch dessen Umwandlung in messbare elektrische Signale erfassen, wodurch sie üblicherweise für Positionieraufgaben bei Maschinenantrieben und in Automatisierungsprozessen Verwendung finden. Der Messvorgang erfolgt durch eine rotierende Relativbewegung zwischen einer Maßverkörperung, welche die Winkelteilung aufweist, und einer Detektionseinheit, die die Winkelinformationen in Form elektrischer Ausgangssignale liefert. Grundsätzlich werden Drehgeber zwischen Inkremental- und Absolutwertgebern unterschieden. Letztgenannte werden vorwiegend zur Erfassung von Drehwinkel genutzt. Sie besitzen eine Kodierscheibe, sodass jede Winkelstellung durch eine eindeutiges Codemuster beschrieben wird. Da für den Einsatzzweck im Fahrradsimulator die Geschwindigkeitserfassung im Vordergrund steht, richtete sich der Fokus auf Inkrementalgeber. Zur Erfassung einer bestimmten Anzahl an PPR dienen u.a. Strichscheiben als Maßverkörperung.

Im Vergleich zu magnetischen Drehgebern, die sich eher durch eine robuste Bauform auszeichnen, bieten optische Funktionsprinzipien die Möglichkeit höhere Auflösungen zu realisieren. Je nach Hersteller werden Winkelteilungen von bis 10.000 Inkrementen angeboten (*Inkrementalgeber* | *Hengstler GmbH*, o. J.).

Durch verschiedenste Ausgangsschaltungen können parallele als auch serielle Schnittstellen wie klassische Punkt-zu-Punkt Verbindungen (bspw. RS-422) aber auch Netzwerk und Busschnittstellen (bspw. Ethernet, CAN-Bus) modular ausgewählt werden. Verglichen mit der beim BikeSim vorhandenen BLE Übertragungsmethode, die nur eine geringe Datenübertragungsrate ermöglicht (siehe Kapitel 3.2.1), können Übertragungsformate wie bspw. RS-422 (unter

Berücksichtigung kurzer Datenleitungen <12 m) Übertragungsgeschwindigkeiten von bis zu 10 Mbps erreichen (Samson AG, o. J., S. 33).

Für eine bessere Vergleichbarkeit der einzelnen Sensoriken und ihren Eigenschaften dient Tabelle 2. Die Eigenschaften wurden auf einer Skala von -2 (--) bis +2 (++) bewertet.


Tabelle 2: Tabelle Lösungsansätze Geschwindigkeitserfassung

	<b>Sensorisches Innenlager</b>	<b>Magnetischer Zahnradgeber</b>	<b>Drehgeber (Inkrementalgeber)</b>
<b>Messauflösung</b>	-	++	++
<b>Bauraumbedarf</b>	++	0	+
<b>Montageaufwand</b>	+	--	+
<b>Schnittstellen- auswahl</b>	0	+	++
<b>Signalqualität</b>	-	++	++
<b>Messstelle am BikeSim</b>	Pedal Kurbel- welle	Schwungrad Rollentrainer	Schwungrad Rollentrainer

**Fazit:** Die aufgezeigten Drehgeber Spezifikationen hinsichtlich hoher Messgenauigkeit sowie -auflösung, kompakter Bauweise, zweckmäßigen Montageaufwand und großer Auswahl an Implementierungsmöglichkeiten erfüllen das Anforderungsprofil für die gesuchte Lösung. Folglich wurde die anschließende Konzeptumsetzung an die Verwendung eines Inkrementalgeber ausgerichtet.

Eine Übersicht der technischen Eigenschaften des ausgewählten Drehgebers ist Tabelle 3 zu entnehmen (Datenblatt befindet sich im Anhang A - Inkrementaler Drehgeber KIH40) (Zerbo, o. J.). Die Beschreibung der finalen Konzeptumsetzung bezüglich Montage und Integration in die Datenbasis der Simulationsumgebung erfolgt in Kapitel 3.6.3.

Tabelle 3: Spezifikation des Inkremental Drehgebers

Inkremental Drehgeber (Hohlwelle) Typ: 8.KIH40.5462.2048	Bauteilspezifikationen 
Flansch	Mit Statorkupplung
Sackloch-Hohlwelle	Ø 8 mm
Ausgangsschaltung	RS-422 (mit Invertierung)
Versorgungsspannung	5 V DC
Impulszahl	2048 PPR (physikalisch) – mit Impulsvervielfachung durch Flankenbewertung: <b>8192 PPR</b>
Anschlussart	Kabelausgang radial; 2 m

### 3.6.2 Konzeptfindung Bremssystem

Wie am Anforderungsprofil zur Konzeptüberarbeitung des Bremssystems ersichtlich ist, soll die Bremsverzögerung des Schwungrads erhöht werden. Da die Ansteuerung im Ausgangszustand der Bremseinheit nur durch einen Bremshebel erfolgt, beschreibt eine zusätzliche Vorgabe, dass das Auslösen des Bremsvorgangs mit dem linken und rechten Bremshebel ermöglicht werden soll.

Auf Grundlage der in Kapitel 3.3 dargestellten Analyse des bestehenden Systems wird deutlich, dass der Einsatz einer Felgenbremse keinen Mehrwert der Verzögerungsleistung bewirkt und daher nicht zielführend ist. Als Alternative zur Felgenbremse kommen bevorzugt Nabenbremsen zum Einsatz. Hierzu zählen Bremssysteme, die entweder in der Felgennabe integriert sind (bspw. Trommel- oder Rücktrittbremsen) oder aber an der Nabe befestigt sind (bspw. Scheibenbremse). Aufgrund der Forderung den bereits vorhandenen Rollentrainer weiter zu nutzen, erschien die Verwendung einer von außen an das Schwungrad

angebrachten Scheibenbremse am geeignetsten. Darüber hinaus ermöglicht dies den Anbau zweier Bremshebel, die in Verbindung mit den Bremssättel unabhängige Ansteuerungssystem darstellen.

### **3.6.3 Konzeptumsetzung Geschwindigkeitsmessung & Bremsystem**

Ausgehend der zuvor entwickelten Konzeptideen (Kapitel 3.6.1 und 3.6.2) erfolgt deren Umsetzung, was sowohl die hardware- als auch softwareseitige Integration in die Simulationsumgebung beschreibt. Die Geschwindigkeitserfassung mittels Drehgeber sowie das Bremsen mittels Scheibenbremse stehen in Abhängigkeit zur Drehbewegung des Rollentrainer-Schwungrads, weshalb dessen Montagekonzept gesamtheitlich betrachtet wird. Im Anschluss wird auf die Signal- und Datenverarbeitung der Inkrementalwerte des Encoders eingegangen. Der Abschluss des Kapitels beschreibt die erarbeitete Umrechnungsvorschrift zur Bestimmung der Fahrgeschwindigkeit.

#### **Mechanische Konstruktion**

Bei der Auswahl der Drehgeber-Bauweise musste u.a. der maximal zur Verfügung stehende Bauraum im Bereich des Rollentrainers berücksichtigt werden. Dieser wird durch den Bewegungsraum der dynamischen Bewegungsplattform bestimmt, da es während des Verfahrens zu keiner Kollision mit der umliegenden, feststehenden Plattform kommen darf. Drehgeber können zur Erfassung der Rotation entweder direkt auf die zu messende Welle gesteckt (Hohlwellengeber) oder mit einem Wellenende verbunden (Vollwellengeber) werden. Folglich ermöglichte die Wahl des Hohlwellengebers (Abbildung 14, Pos. 6) den Wegfall einer zusätzlichen Kupplung, wodurch in Verbindung mit der geringeren Einbautiefe ein um bis zu 50% geringerer Bauraum benötigt wird. Abbildung 13 zeigt die Bauraumüberprüfung anhand eines Bereichsmodells (3D-Druck), welches bei maximal geneigter Bewegungsplattform an den Rollentrainer geschraubt wurde.

Dadurch konnte sichergestellt werden, dass im späteren Betrieb keine Engstelle zwischen Messeinheit und statischer Plattform entsteht.

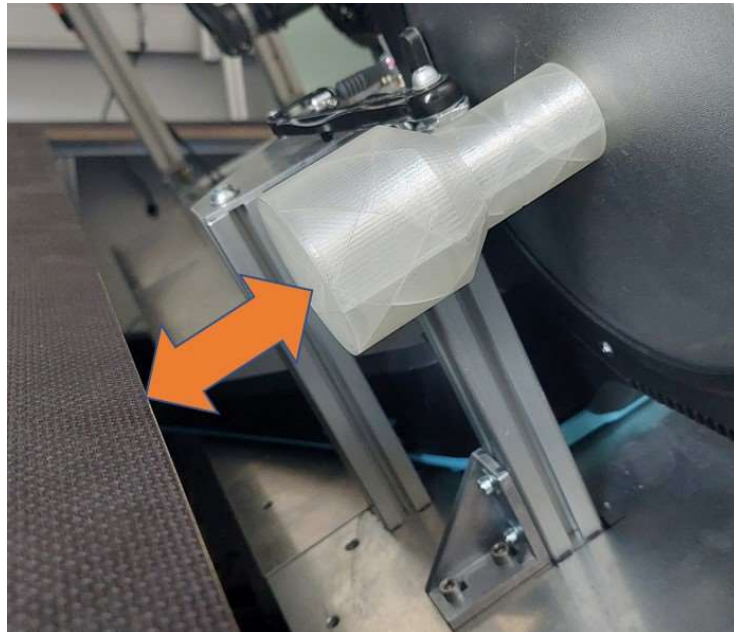


Abbildung 13: Bauraumüberprüfung anhand Bereichsmodell

Zum Aufstecken des Encoders wurde die Welle, auf der das Schwungrad (Abbildung 14, Pos. 1) sitzt, verlängert. Das Außengewinde (M14x1) am Wellenzapfen, welches an der Außenseite des Schwungrads um ca. 10 mm hervorragt, ermöglichte die Erweiterung um ein zusätzliches Wellenelement. Die Verbindungswelle (Abbildung 14, Pos. 2) dient sowohl zum Aufstecken des Hohlwellengebers als auch zur Montage der Bremsscheibe (Abbildung 14, Pos. 4).

Die Bremsscheibe ist mit 160 mm im Durchmesser eine Standardgröße, die für mittlere Bremskräfte, wie bspw. bei Trekkingrädern, ausgelegt ist. Die meistverwendeten Verbindungsarten sind Postmount-Aufnahme („Sechslloch-Standard“) und die Shimano-Centerlock Aufnahme. Während der Einsatz einer Centerlock-Aufnahme die Fertigung einer aufwändigen Außenverzahnung der Welle erfordert hätte, konnte die Postmount-Montage, unter Zuhilfenahme eines 6-Loch-Adapterflansch (Abbildung 14, Pos. 3), vergleichsweise einfach umgesetzt werden. Ein Pressverband (zwischen dem Adapterflansch und der Verbindungswelle) mit zusätzlicher Verdrehsicherung sorgt für die erforderliche Festigkeit, um

die Bremsmomente übertragen zu können. Die Abbildung 14 zeigt die Montageeinheit als 3D-Modell (Pos. 7 und Pos. 8 sind nicht dargestellt).

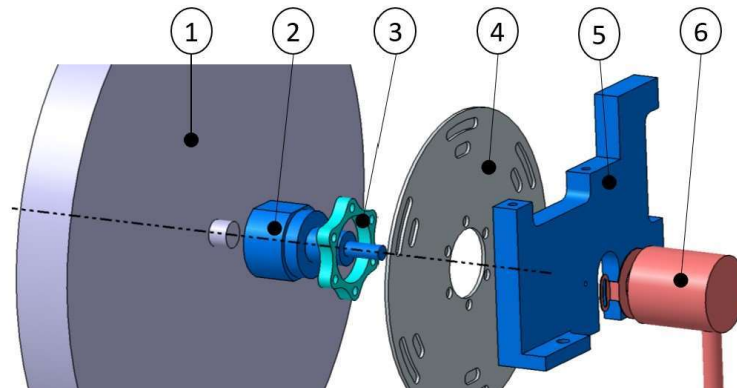


Abbildung 14: 3D-Modell Montageeinheit

Die Befestigung der Bremssättel (Abbildung 15, Pos. 7) wird ebenfalls durch eine individuell entworfene Sonderlösung realisiert. Das obere Vorrichtungsteil (Abbildung 14, Pos. 5) ermöglicht die Montierbarkeit der zwei rechtwinklig angeordneten Bremssättel und die Fixierung der Statorkupplung des Gebers. Zwei Stützen in Form von Aluminiumprofilen (Abbildung 15, Pos. 8) stellen die Verbindung zur Motion-Plattform her. Der vollständige Aufbau in der Simulatorumgebung ist Abbildung 15 zu entnehmen.

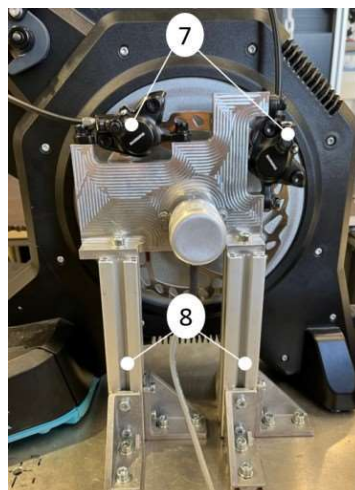


Abbildung 15: Montageeinheit

Informationen über Bauteilspezifikationen aller eingesetzten Komponenten als auch technische Zeichnungen für Pos. 2 und Pos. 5 befindet sich im Anhang B.

## Signal- und Datenverarbeitung

Die digitalisierten Rechteckimpulse des Inkrementalgebers werden mittels einer leitungsgebundenen Datenübertragung an eine Ausleseeinheit weitergegeben. Zur Übermittlung der Inkrementalsignale kommt der in der Industrie häufig verwendete Standard RS-422 (auch als EIA-422 bezeichnet) zum Einsatz. Beim differentiellen Übertragungsformat sind für jeden Ausgangskanal (A, B, C) zwei gleichwertige Leitungen, in Form von verdrehten Aderpaaren (engl.: „Twisted Pair“), vorgesehen. Wie das in Abbildung 16 dargestellte Funktionsprinzip zeigt, wird durch die symmetrische Übertragung der Komplementärsignale (Originalsignal A+ und invertiertes Signal A-) der Einfluss von Störsignalen kompensiert und hohe Übertragungsraten (bis zu 10 Mbps) erreicht (Basler, 2016, S. 117).

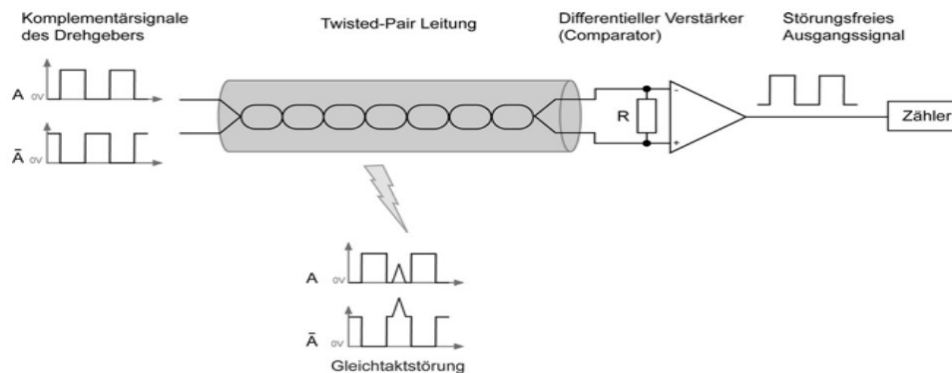


Abbildung 16: Differentielle Datenübertragung

Die Ausleseeinheit (RLS E201-9Q) dient als Impulzzähler und wird per USB-Kabel an den Leitreechner angeschlossen. Darüber hinaus überträgt er die 5 V Versorgungsspannung für die Sensoreinheit. Die Ansteuerung der USB-Geberschnittstelle wird durch eine Kommandoübergabe von ASCII-Zeichen, welche in einem Befehlssatz definiert sind (siehe Datenblatt Anhang A - USB-Geberschnittstelle RLS E201D01\_07) (*E201 USB encoder interface* - [www.rls.si](http://www.rls.si), o. J.), ermöglicht. Je nach gewählten ASCII-Zeichen können neben dem Inkrementalwert auch Status-eigenschaften oder Softwareeinstellungen abgerufen bzw. geändert werden. Für die Formateigenschaften des Inkrementalwerts können Einstellmöglichkeiten wie das Stellenwertsystem (Dezimal und Hexadezimal) sowie die maximalen Zahlengrößen ausgewählt werden. Im Rahmen der BikeSim

Geschwindigkeitserfassung wurde für die weitere Auswertung des Zählerstands ein 8-stelliges Hexadezimal-Format verwendet -ASCII Symbol: „>“- (siehe Abbildung 17).

ASCII COMMAND	ACTION	INTERFACE RESPONSE (with example)
>	Encoder position E201-9Q returns 24 character hexadecimal string + CR comprising 3 sets of 8 character hexadecimal strings	00000d5400000a2400000001 + CR nnnnnnnnrrrrrrrrssssss + CR where: n = encoder count (signed 32 bit) r = count value when reference/index last seen (signed 32 bit) s = status (status value of 1 shows that a reference was detected – use 'c' command to clear)

Abbildung 17: Hexadezimal-Format für Geschwindigkeitserfassung

Zur Berechnung des Geschwindigkeitswerts werden in einem bestimmten Zeitintervall die Anzahl der gemessenen Inkremente erfasst. Die sich anschließende Berechnungsroutine wurde in einer auf C++ basierenden Programmanwendung erstellt und in die DLR-interne Softwareumgebung Dominion implementiert.

Die Berechnungsvorschrift für die virtuelle Fahrgeschwindigkeit  $v_F$  beruht auf einer Fahrradgröße  $r_{Rad}$  von 28 “:

$$v_F = r_{Rad} \cdot \omega_{Rad} \quad (2)$$

mit  $\omega_{Rad} = 2 \cdot \pi \cdot n_{Ritzel}$

Das interne Übersetzungsverhältnis des Rollentrainers  $i$  ist:

$$i = \frac{z_{Abtrieb}}{z_{Antrieb}} = \frac{1}{7} = \frac{n_{Ritzel}}{n_{SR}} \quad (3)$$

Hierdurch lässt sich nun die Drehzahl des Schwungrads bestimmen:

$$n_{SR} = \frac{\text{Umdrehungen}}{\Delta t} = \frac{\Delta \text{Inkremente}}{t_{now} - t_{end}} \quad (4)$$

Durch Einsetzen der Formeln (7) und (8) in die Grundformel (2) kann nun die Fahrgeschwindigkeit  $v_F$  berechnet werden:

$$v_F = \frac{r_{rad} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \Delta \text{Inkremente}}{7 \cdot (t_{now} - t_{end}) \cdot \text{Auflösung}} \quad (5)$$

Abbildung 18 stellt die wesentlichen Schritte der internen Programmschleife dar und zeigt die Kommunikation mit den peripheren Hardware- und Simulationselementen. Der komplette Programmabschnitt der Dominion-Applikation ist im Anhang C hinterlegt.

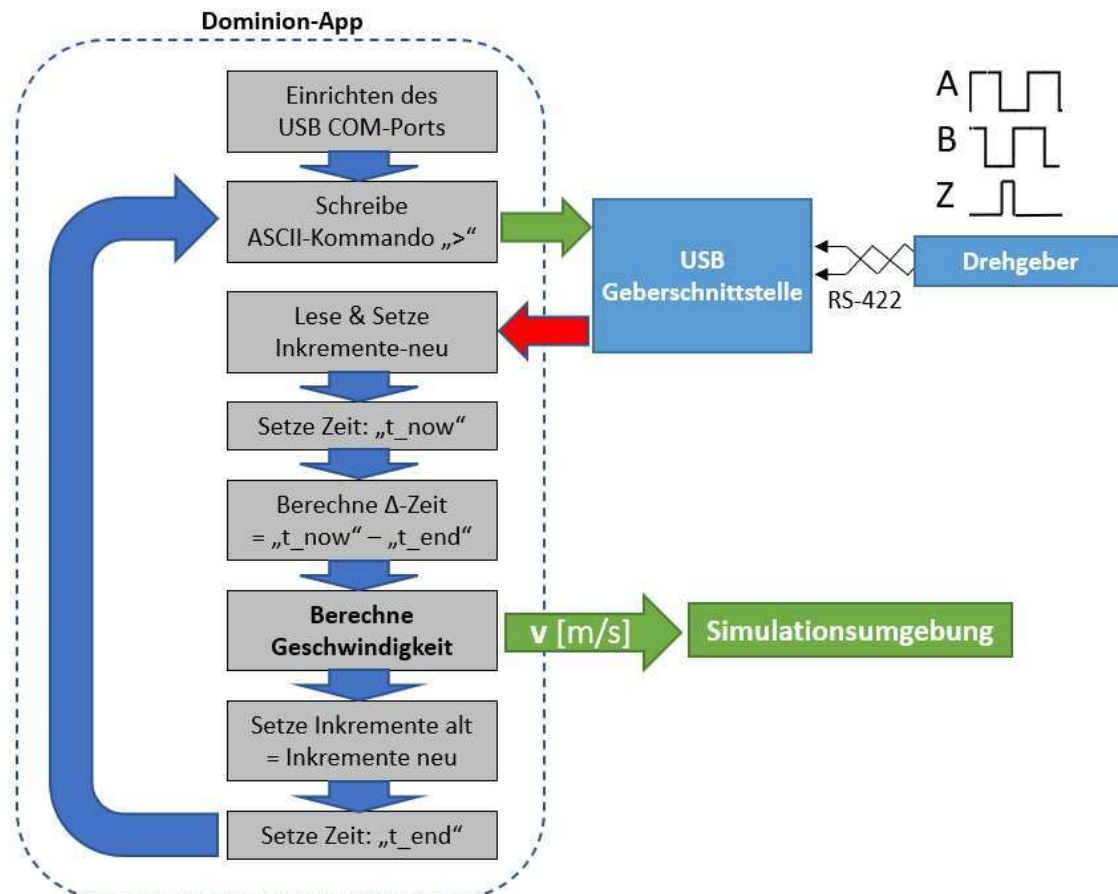


Abbildung 18: Berechnungsroutine zur Geschwindigkeitserfassung

### 3.7 Konzeptoptimierung Fahrtwind

Mit der Simulation des Fahrtwindes rückt ein weiteres Force-Feedback-Modul in Form eines Bodenventilators in den Fokus. Wie die zuvor durchgeführte Analyse der Ausgangssituation (Kapitel 3.4) gezeigt hat, konnte die Windstärke ausschließlich manuell über die vier integrierten Geschwindigkeitsstufen eingestellt werden. Die im Kapitel 3.5 definierte Festanforderung verlangt, dass der

Fahrtwind (analog zur Realität) in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit gesteuert werden soll.

Da der Headwind-Simulator zusätzlich über den Funkstandard BLE verfügt, sollte der Datenaustausch (analog zur ursprünglichen Geschwindigkeitsmessung mit dem Rollentrainer) mittels Client/Server Prinzip zwischen Leitreechner und Ventilator erfolgen. Zum besseren Verständnis wird an dieser Stelle auf das BLE-spezifische Kommunikationsprofil „Generic ATtribute“ (GATT) näher eingegangen. Peripheriegeräte (GATT Server) verbinden sich nur mit einem zentralen Gerät (GATT Client) gleichzeitig. Hingegen GATT Clients (z.B. ein PC) mit mehreren BLE-fähigen Geräten kommunizieren können. Nach dem Kopplungsprozess startet das Hauptgerät durch eine Anfrage (Request) den sich immer wiederholenden Datenaustausch, woraufhin die Datenbereitstellung des Peripheriegerätes erfolgt (Response). Die GATT Struktur der Peripheriegeräte beschreibt den Aufbau der Datenpakete, welche aus hierarchisch angeordneten Objekten zusammengesetzt ist. Das höchste Level sind die Profile, die allerdings nicht selbst in den Endgeräten vorzufinden sind, da sie lediglich eine Sammlung gleichartiger Dienste darstellen. Die Kommunikationsweise hängt daher vorrangig von Diensten (Services) und den darin enthaltenen Schlüsselmerkmalen (Characteristics) ab. Diese werden durch ihre numerische ID, der Universally Unique Identifier (UUID), eindeutig beschrieben. Abbildung 19 zeigt die GATT Struktur der Peripheriegeräte im Rahmen des Client/Server Kommunikationsprinzip.

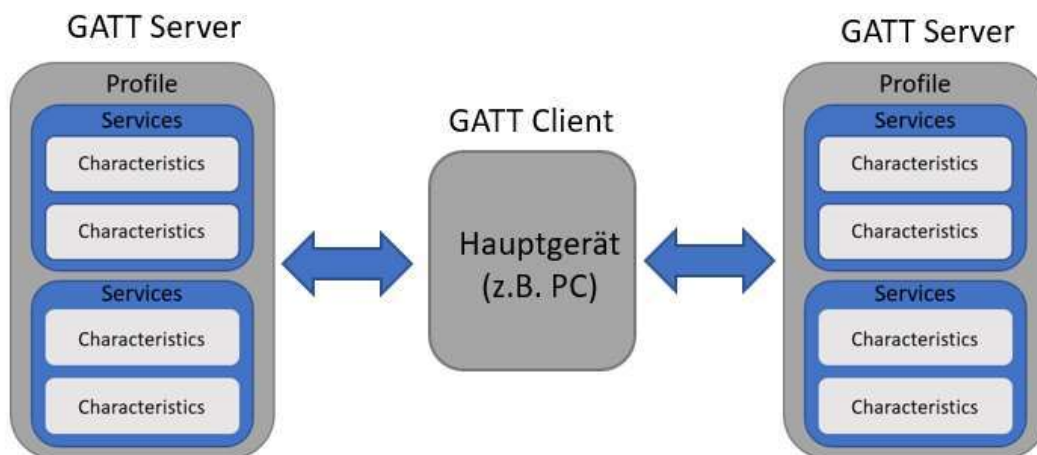


Abbildung 19: GATT Struktur & BLE Client/Server Kommunikationsprinzip

Üblicherweise werden standardisierte Characteristics verwendet, dessen Werte über einen vordefinierten Schlüssel gelesen oder geschrieben werden, oder auch beides. Beispielsweise hat die Characteristic zur Herzfrequenzmessung die UUID 0x2A37 (*Introduction to Bluetooth Low Energy*, o. J.). Der erste 8-Bit-Wert definiert die Gestalt des Request-Vorgangs, woraufhin die Herzfrequenzmessdaten bereitgestellt werden. Diese Standardcharakteristika werden u.a. von der Bluetooth Special Interest Group (SIG) verwaltet und sind öffentlich zugänglich (*SIG Webseite | Bluetooth® Technologie*, o. J.). Soft- bzw. Hardwareentwickler können jedoch eigenständig entscheiden, ob sie standardisierte Formate verwenden oder benutzerdefinierte Konzepte definieren. Nach Analyse der GATT Struktur des Bodenventilators stellte sich heraus, dass dieser eine herstellereigene Konfiguration der Characteristics besaß. Zwar war es möglich, einen Verbindungsaufbau herzustellen und Daten auszulesen, jedoch konnte aufgrund der speziellen Characteristic kein geeignetes Schreibformat erstellt werden. Abbildung 20 zeigt die Datenstruktur des Bodenventilators und die herstellereigene UUID, welche den Datenaustausch mit dem Leitreechner und folglich auch die Ansteuerung des Headwind-Simulators zunächst verhinderte.

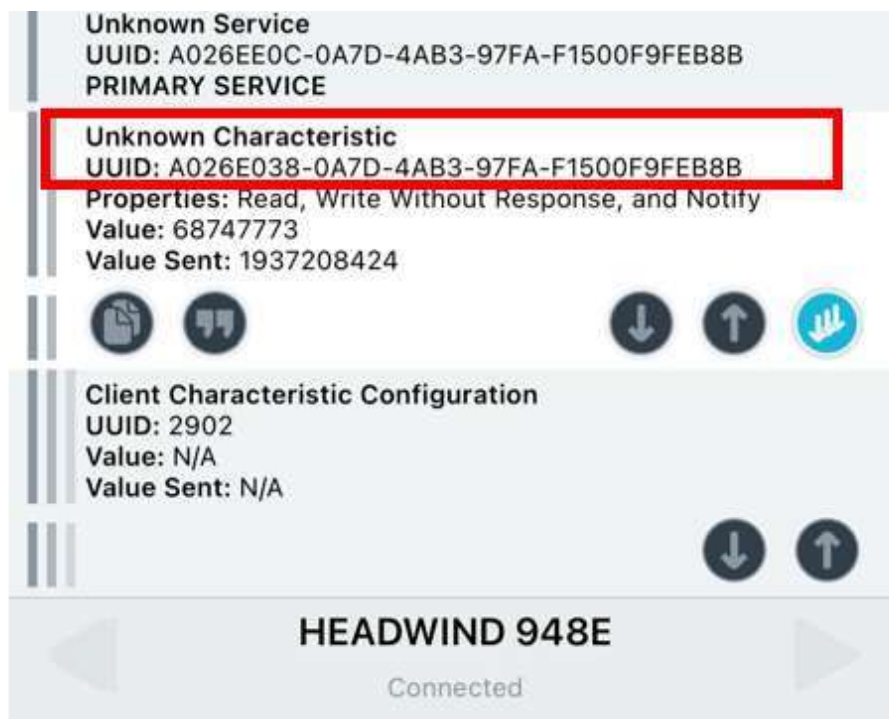


Abbildung 20: Ausschnitt GATT Struktur Headwind-Simulator

Auf der Suche nach einer Alternativlösung wurden Kommunikationsmöglichkeiten zwischen Rollentrainer und Bodenventilator beleuchtet. Beide Komponenten besitzen neben der BLE-Schnittstelle eine weitere Funkübertragungsmöglichkeit in Form des ANT+ Standards. Die Zielanwendungen für ANT+ sind drahtlose Sensoren für Sport, Wellness und Gesundheit. Ähnlich wie BLE-Geräte besitzen ANT+ Module vorprogrammierte Profile, womit deren Anwendungsgebiete (Herzfrequenz, Temperaturmessung etc.) definiert werden. ANT+ baut auf dem bereits vorhandenen ANT-Protokoll auf und wird als Interoperabilitätsprotokoll definiert (Dynamstream Innovations Inc., 2014, S. 7). Das bedeutet, die Kopplung sowie Kommunikation zwischen ANT+ Geräten kann ohne zentrale Instanz wie einen Server erfolgen. Da sich auf ein standardisiertes Kommunikationsformat geeinigt wurde, ermöglicht dies die Komptabilität zwischen verschiedenen Geräten unterschiedlicher Hersteller (Mehmood & Culmone, 2016, S. 313). Dies war auch im Falle der BikeSim Umgebung von Vorteil, da hierdurch eine Kopplung zwischen dem Rollentrainer (Fa. TacX) und dem Headwind-Simulator (Fa. Wahoo) erreicht wurde. Mittels der Hersteller-App des Ventilators konnte zudem der Geschwindigkeitskorridor eingestellt werden, in dem die Windstärke gesteuert wird.

### **3.8 Analyse Bremsensystem**

Im Folgenden werden anhand einer Vergleichsberechnung die unterschiedlichen Verzögerungswerte der Bremsanlagen gegenübergestellt, wodurch die gestiegene Bremsleistung der modifizierten Variante veranschaulicht werden soll.

In der BikeSim-Testumgebung beruht das virtuelle Bremsen auf die reale Verzögerung des Rollentrainers. Die Vergleichsanalyse erfolgt daher auf Basis der beim Bremsvorgang zurückgelegten Drehbewegung des Rollentrainer-Schwungrads. Die Ermittlung der Bremswege erfolgt unter Berücksichtigung folgender Ausgangssituation: Das virtuelle Fahrrad soll aus einer konstanten Fahrgeschwindigkeit  $v_F$  von 5,5 m/s (ca. 20 km/h) zum Stoppen kommen. Zwecks Vergleichbarkeit werden beide Bremsvorgänge über lediglich einen Bremshebel,

welcher mit einer gängigen Handkraft  $F_H$  in Höhe von 200 N (Breuer & Bill, 2012, S. 235) betätigt wird, eingeleitet.

Beim Bremsvorgang wird die Rotationsbewegung so lange durch die Reibkraft  $F_R$  der unterschiedlichen Bremsmechanismen gehemmt, bis das Schwungrad zum Stehen kommt. Folglich wird die kinetische Rotationsenergie  $E_{rot}$  des Schwungrads durch das Verrichten einer Reibarbeit  $W_R$  in thermische Energie umgewandelt. Die Abbildung 21 zeigt den jeweils wirksamen Radius und Angriff der Reibkraft  $F_R$  der vorherigen und modifizierten Bremsanlage.

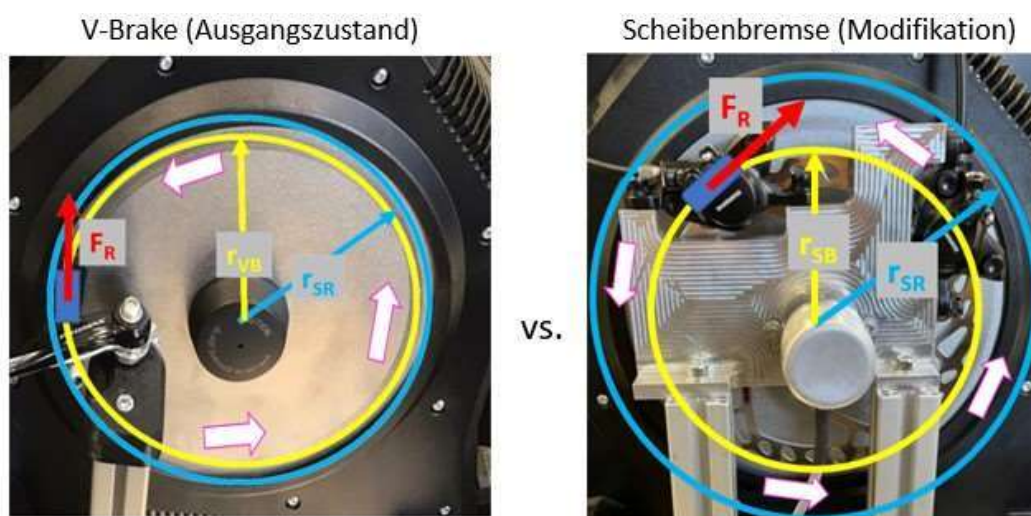


Abbildung 21: Wirksame Radien (gelb) beider Bremsanlagen

Im Sinne des Energieerhaltungssatzes gilt:

$$E_{rot} = W_R$$

$$\frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 = F_R \cdot s \quad (6)$$

Das Trägheitsmoment  $J$  für rotierende Scheiben wird beschrieben mit:

$$J = \frac{1}{2} \cdot m_{SR} \cdot r_{SR}^2 \quad (7)$$

Die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  in Abhängigkeit der Drehzahl  $n_{SR}$  lautet:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n_{SR} \quad (8)$$

Die Reibkraft  $F_R$  berechnet sich aus dem Produkt von Bremsnormalkraft  $F_N$  und der spezifischen Gleitreibungszahl  $\mu_R$ :

$$F_R = F_N \cdot \mu_R \quad (9)$$

Die Gesamtverstärkung  $i_{ges}$  der Handkraft  $F_H$  beschreibt das Produkt der Übersetzungsverhältnisse am Griff  $i_h$  und an der Bremse  $i_z$  – es gilt somit:

$$i_{ges} = i_h \cdot i_z \quad (10)$$

Entsprechend kann die Bremsnormalkraft folgendermaßen beschrieben werden:

$$F_N = F_H \cdot i_{ges} \quad (11)$$

Für die Bogenlänge  $s$  eines Kreisausschnitts  $\alpha$  gilt:

$$s = \frac{r_w \cdot \pi \cdot \alpha}{180^\circ} \quad (12)$$

Durch Einsetzen der Formeln (7) bis (12) die Grundformel (6) kann der Kreisausschnitt  $\alpha$  und somit der Bremsweg bestimmt werden:

$$\alpha = \frac{m_{SR} \cdot r_{SR}^2 \cdot n_{SR}^2 \cdot \pi \cdot 180^\circ}{F_H \cdot i_{ges} \cdot r_w \cdot \mu_R} \quad (13)$$

Die Drehzahl des Schwungrads  $n_{SR}$  wird mithilfe des ermittelten Übersetzungsverhältnis  $i$  zwischen Antrieb und Abtrieb des Rollentrainers berechnet:

$$i = \frac{z_{Abtrieb}}{z_{Antrieb}} = \frac{z_{SR}}{z_{Ritzel}} = \frac{1}{7} = \frac{n_{Ritzel}}{n_{SR}} \quad (14)$$

Mit  $n_{Ritzel} = \frac{v_f}{u_{Rad}}$  ergibt sich für  $n_{SR}$ :

$$n_{SR} = 7 \cdot \frac{v_F}{u_{Rad}} \quad (15)$$

In der Berechnungsvorschrift für die Fahrgeschwindigkeit  $v_F$  ist ein Raddurchmesser von 0,3 m hinterlegt, was einer 28 " Felge entspricht. Bei einer Fahrgeschwindigkeit  $v_F$  von 5,5 m/s beträgt die Drehzahl des Schwungrades  $n_{SR}$  demnach:

$$n_{SR} = 7 \cdot \frac{5,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 \cdot \pi \cdot 0,3 \text{ m}} = 20,42 \frac{1}{\text{s}} \quad (16)$$

Durch die Schritte kann nun der Kreisausschnitt  $\alpha$  final für beide Versionen bestimmt werden. Zur besseren Übersicht werden die einzelnen Werte beider Bremsanlagen in Tabelle 4 ( $i_x$ : (Wolfsteller, 1998, S. 29) $\mu_R$ : (Artmann et al., 2019, S. 535)) gegenübergestellt.

Tabelle 4: Übersicht der Werte zur Berechnung des Kreisausschnitts  $\alpha$

Parameterbezeichnung	Ausgangssituation V-Brake	Optimierung Scheibenbremse
Handkraft $F_H$	200 N	
Masse Schwungrad $m_{SR}$	8,14 kg	
Radius Schwungrad $r_{SR}$	0,12 m	
Drehzahl Schwungrad $n_{SR}$	20,42 s <sup>-1</sup>	
Übersetzung Griff $i_h$	2	5 - 6,5
Übersetzung Bremse $i_z$	1,75 (3,5/2)	4,2 - 6
Gesamtübersetzung $i_{ges}$	3,5	21 - 39
Gleitreibungszahl $\mu_R$	0,9	0,5
Wirksamer Radius $r_w$	$r_{VB}=0,095 \text{ m}$	$r_{SB}=0,075 \text{ m}$

Nach Einsetzen der Berechnungswerte in Formel (13) ergeben sich für den Vergleich der zurückgelegten Kreisausschnitte  $\alpha$  folgende Endergebnisse:

$$\begin{aligned} \text{Bremsweg V-Brake: } \alpha_{VB} &= \mathbf{461^\circ} \\ \text{Bremsweg Scheibenbremse: } \alpha_{SB} &= \mathbf{122^\circ} \text{ (bei mittlerer Übersetzung)} \end{aligned} \quad (17)$$

**Ergebnis:** Die Verzögerungsleistung des BikeSim-Bremssystems konnte durch die Konzeptumsetzung um das 3,8-fache gesteigert werden.

### 3.9 Analyse Geschwindigkeitsmessung

Dieses Kapitel behandelt anhand objektiver Kriterien die Evaluation der qualitäts-gesteigerten Geschwindigkeitserfassung. Hierfür wurden mithilfe des laborinter-nen Datenloggers (Simlogger) Geschwindigkeitsverläufe während der Proban-denstudie aufgezeichnet (García & Gröne, 2022a). Abbildung 22 beschreibt die Fahrtverläufe eines Probanden mit der ursprünglichen und optimierten Messme-thodik des gleichen Szenarios.

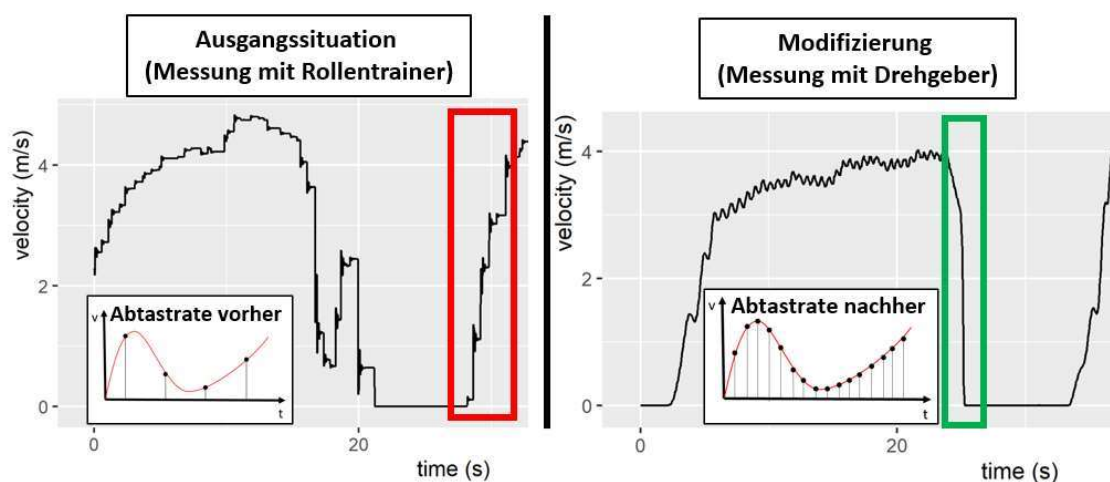


Abbildung 22: Vergleich Geschwindigkeitsplot BikeSim

Der Vergleich der markierten Bereiche zeigt, dass der Graphenverlauf der überarbeiteten Variante gleichmäßiger steigt bzw. fällt und keine groben Abstufungen vorhanden sind. Hierdurch lässt sich der Einfluss der gestiegenen Messauflö-sung um das 683-fache (12 PPR vs. 8192 PPR) und die Erhöhung der maximale Übertragungsgeschwindigkeit um mehr als das 10-fache (wenige 100 Kbps vs. 10 Mbps) ablesen. Beides trägt dazu bei, dass Laufzeitdauer der Berechnungs-routine von 300 ms auf 10 ms reduziert wurde. Die hierdurch erhöhte Abtastrate sorgt für eine in gleicher Weise gesteigerte Bildfrequenz, welche sich in einer ruckelfreien Visualisierung von Beschleunigungs- bzw. Abbremsvorgängen aus-drückt. Zusätzlich konnte eine Berechnungsvorschrift für eine an die Realität an-gepasste Fahrgeschwindigkeit entwickelt werden (Kapitel 3.6.3). Mit Parallelmes-sungen wurde ein durchschnittlicher Geschwindigkeitsunterschied von -2,5 km/h gegenüber des ursprünglichen Messverfahrens festgestellt.

## 4 Probandenstudie

Ziel dieses Kapitels ist die Prüfung der Validität des Fahrradsimulators, bevor er zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen und für die Verkehrssicherheitsforschung genutzt werden kann. Um die Nutzbarkeit zu evaluieren, werden die Ausgangskonfiguration und das weiterentwickelte Simulator-Setup (im Weiteren als Fahrprofil bezeichnet) in einer Probandenstudie gegenübergestellt. Die Studie ist so aufgesetzt, dass die Reihenfolge der Fahrprofile randomisiert erfolgt, um valide und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Im Rahmen der Validierungsstudie werden zusätzlich der längsdynamischen Weiterentwicklungen querdynamische Änderungen einer separat durchgeführten Bachelorarbeit evaluiert. Hierdurch können die Vorteile und die Simulationsgüte des Fahrradsimulators ermittelt werden. Die Evaluierung der Studie soll auf subjektive Merkmale, wie Akzeptanz, Realismus und Simulatorkrankheit, basieren.

Ziel ist es, 30 komplette Datensätze von volljährigen Personen, unabhängig ihres Geschlechts, die mindestens einmal im Monat Fahrrad fahren, zu erzeugen und analysieren. Die markanten Unterschiede zwischen beiden Fahrprofilen sind in Tabelle 1 aufgeführt (García & Gröne, 2022b), wobei die längsdynamischen Anpassungen farblich hervorgehoben sind.

Tabelle 5: Unterschiede der Fahrprofile

Feature	Fahrprofil Alt	Fahrprofil Neu
<b>Fahrtwind</b>	Statisch bzw. nicht geschwindigkeitsabhängig	Dynamisch bzw. geschwindigkeitsabhängig
<b>Antrieb</b>	Nicht modifizierter Krafttrainer BLE → Niedrige Auflösung, hohe Latenz Scheibenbremse am Schwungrad Hinweis: Gangschaltung defekt	Modifizierter Krafttrainer Drehgeber → Hohe Auflösung, niedrige Latenz Scheibenbremse am Schwungrad Hinweis: Gangschaltung defekt

<b>Lenkung</b>	Modifizierte Lenkkraftsimulation basierend auf Kraftfahrzeugen (KFZs)	Modellbasierter Ansatz & Berechnung des Lenkwiderstandes durch Physikmodell
<b>Lehnen</b>	Kraftregelung der Plattform	Modellbasierter Ansatz & Positionsregelung der Plattform

Die Datensätze für die Studiauswertung sind auf einer DLR Intranetseite archiviert (García & Gröne, 2022a). In den folgenden Unterkapiteln werden die Validierungsfragen und –hypothesen aufgestellt, die Konzeptionierung der Trainings und Szenarien dargestellt, ehe die Durchführung der Studie und die Auswertung der Ergebnisse den Abschluss dieses Kapitels bildet.

## 4.1 Validierungsfragen und -hypothesen

Das Hauptaugenmerk der Änderung und Auslegung der längsdynamischen Force-Feedback-Komponenten ist bereits in den Kapiteln 3.6 und 3.7 detailliert beschrieben und dokumentiert worden. Auf Grundlage dieser Anpassungen lassen sich Validierungsfragen und -hypothesen bilden (Tabelle 6), welche innerhalb der Probandenstudie zu beantworten sind. Durch die Klärung der Fragestellungen und Hypothesen kann eine Abschätzung und ein Ausblick für weitere Forschungen gestellt werden.

Tabelle 6: Validierungsfrage und Validierungshypothese

<b>Kürzel</b>	<b>Validierungsfrage / -hypothese</b>
<i>VH1</i>	Die längsdynamischen Leistungsverbesserungen rufen eine Erhöhung der Akzeptanz des Simulators hervor.
<i>VF1</i>	Kann durch die Optimierung der längsdynamischen Force-Feedback-Komponenten der Realitätsgrad gesteigert werden, und welche Anpassung hat hierbei die größte Wirkung?

## 4.2 Entwicklung der Trainings und Szenarien

Um den Probanden eine Eingewöhnungsphase für den Simulator und die Simulationsumgebung zu ermöglichen, werden zwei Trainingsfahrten mithilfe der Unreal Engine Software konzipiert. Im ersten Training sollen die Teilnehmer sich mit den reinen MMS Eigenschaften vertraut machen, ehe sie im Zweiten die VR-Umgebung durch Nutzung des HMD und der VR-Handschuhe kennenlernen.

Die Trainingsfahrten, mit einer Gesamtfahrzeit von ca. 15 Minuten, bestehen aus verschiedenen Aufgaben innerhalb der Ortschaft Cremlingen bei Braunschweig und Wolfsburg, um die Möglichkeiten des Fahrradsimulators aufzuzeigen. Die entwickelten Trainingsdurchgänge mit ihren Aufgaben sind in Abbildung 23 und Abbildung 24 dargestellt (García & Gröne, 2022c)

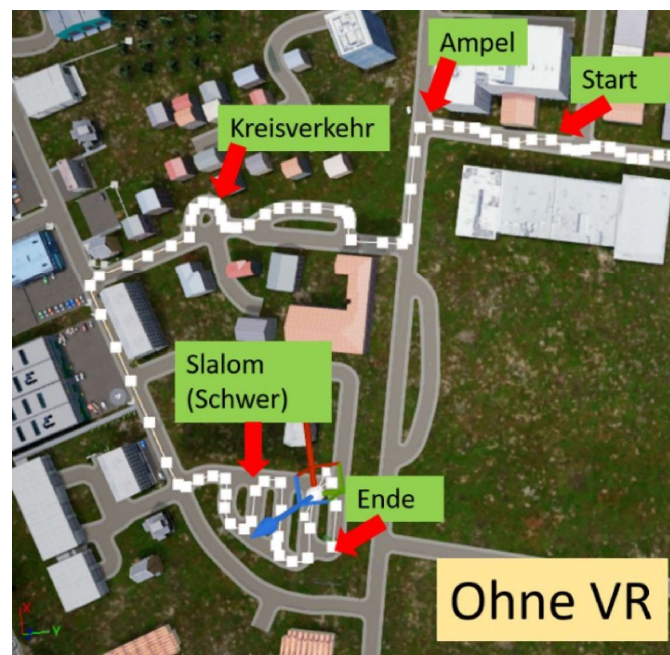


Abbildung 23: Training ohne VR



Abbildung 24: Training mit VR

Für die Validierungsstudie des Fahrradsimulators werden sechs Szenarien mit der Unreal Engine Software konzipiert, welche die Unterschiede zwischen dem vorherigen und dem neuentwickelten Fahrprofil aufweisen sollen. Die Szenarien sind so gestaltet, dass die Realisierung des Fahrtwinds, der Fahrgeschwindigkeit und der resultierenden Beschleunigungsvorgänge sowie der Bremsvorgänge getestet werden können. Für die Szenarien werden ca. 30 Minuten eingeplant.

Die unterschiedlichen Szenarien werden im Folgenden beschrieben:

- a) Überquerung der Forschungskreuzung in Braunschweig nach Stoppen an einer Ampel und anschließendem Ausweichen einer Baustelle
- b) Slalomfahrt in Cremlingen, die durch Baustellenbarken dargestellt 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 verschiedenen Szenarien sind in Abbildung 25, Abbildung 26 und Abbildung 27 erkennbar (García & Gröne, 2022c).



Abbildung 25: Szenario a.) (links) und Szenario b.) (rechts)

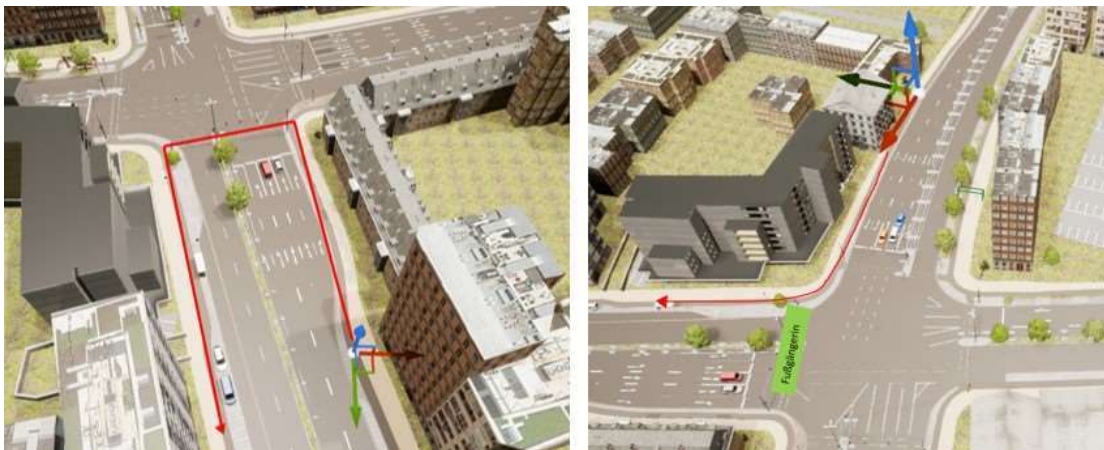


Abbildung 26: Szenario c.) (links) und Szenario d.) (rechts)

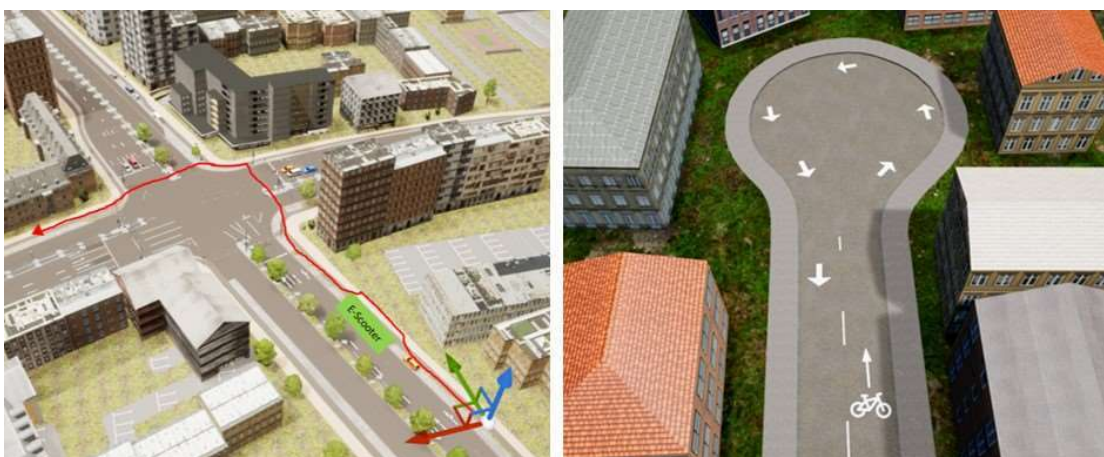


Abbildung 27: Szenario e.) (links) und Szenario f.) (rechts)

### 4.3 Durchführung der Probandenstudie

Im folgenden Unterkapitel wird die Durchführung der Validierungsstudie erklärt und beschrieben.

Zunächst werden den VPs grundlegende Informationen zum Fahrradsimulator und der Probandenstudie durch die Versuchsleitung (VL) erklärt und Instruktionen zur Benutzung des Simulators bereitgestellt. Nach Unterzeichnung der Einwilligungserklärung und Beantwortung des demographischen Fragebogens führt der Teilnehmer das Training ohne VR durch, um die Dynamik des Simulators in den Hauptpunkten Bremsen, Beschleunigen, Abbiegen und Fahren kennenzulernen. Danach wird das Training inklusive VR gestartet, sodass die Fahrdynamik in Kombination mit der Simulationsumgebung erprobt wird. Im weiteren Verlauf folgen die in Kapitel 4.2 entwickelten Szenarien und Aufgabenstellungen. Nach Beendigung eines Szenarios erfolgt die Abfrage des Wohlbefindens durch die sog. Misery Scale (MISC), welche in der Simulationsumgebung ersichtlich ist und dessen Beantwortung der VL verbal mitgeteilt wird.

Sind alle Szenarien und Aufgabenstellungen erledigt, beantwortet der Teilnehmer einen Fragebogen bezüglich des ersten Durchgangs („Nach jedem Fahrprofil“), welcher Fragen hinsichtlich Simulatorkrankheit, Präsenz, Akzeptanz und Realismus beinhaltet. Nach Beantwortung des Fragebogens startet die VP mit dem zweiten Teil der Studie, wobei hier das Fahrprofil wechselt, um die Vergleichbarkeit evaluieren zu können.

Zunächst werden ebenfalls die Trainingsfahrten durchgeführt, sodass eine Eingewöhnung an die veränderte Fahrdynamik erfolgt, ehe die weiteren Szenarien folgen. Das Wohlbefinden wird erneut mittels MISC-Fragebogen sichergestellt. Im Anschluss des zweiten Durchgangs ist neben dem bisherigen Fragebogen ein Abschlussfragebogen zu beantworten, welcher konkreten Abfrage zu beiden Fahrprofilen inkludiert.

Die gesamte Studiendurchführung ist in Abbildung 28 (García & Gröne, 2022d) ersichtlich, zudem können die Fragebögen dem Anhang D entnommen werden.

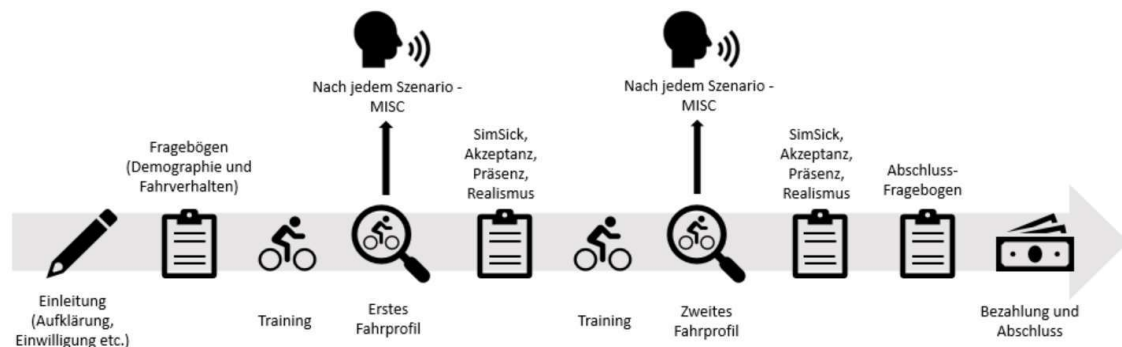


Abbildung 28: Ablauf der Studiendurchführung

Aus den Angaben der VPs ist zu ermitteln, welches Fahrprofil einen höheren Akzeptanzgrad, ein stärkeres Präsenzepfinden und eine geringere Schwere der Simulatorkrankheit hervorruft. Aufbauend auf den Ergebnissen sind weitere Schlussfolgerungen zu ziehen, inwiefern das Simulator-Setup weiter verbessert und Simulatorstudien effizienter durchgeführt werden können.

#### 4.4 Bewertung der Studienergebnisse

An der Validierungsstudie des BikeSim, der BikeEval2, nahmen insgesamt 35 Testpersonen teil, wovon acht VPs die Studie vorzeitig beendet haben. Die Angaben der betroffenen Personen werden nicht berücksichtigt, wodurch die folgenden gesamtheitlichen Auswertungen und Ergebnisse sich auf eine Stichprobengröße  $N = 27$ , die jeweilige reihenfolgenbezogene Evaluierung auf eine Stichprobengröße  $N = 16$  (Durchführung Alt-Neu) bzw.  $N = 11$  (Reihenfolge Neu-Alt), beziehen.

Die Teilnehmer 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.

18,52 % bzw. fünf Testpersonen hatten keine Erfahrung mit VR, hingegen nutzten 29,63 % also acht Probanden mehr als zehn Mal eine VR-Brille (Abbildung 29).

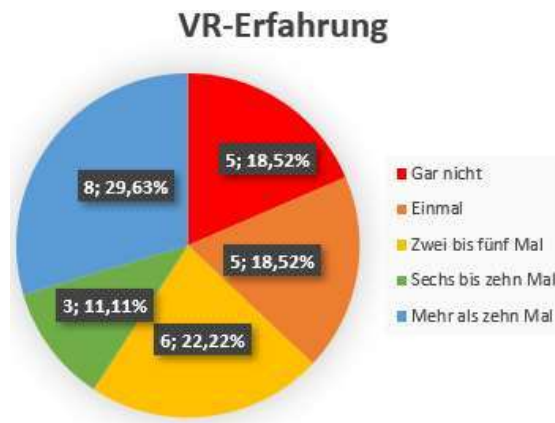


Abbildung 29: VR-Erfahrung der erfolgreich teilgenommenen Probanden

Zusätzlich zur VR-Erfahrung wurde das Auftreten von Kinetose und dessen Schwere ermittelt: 74,17 % / 20 VPs haben keine Beschwerden und 7,41 % bzw. zwei Testpersonen gaben an, dass sie unter einer mittelschweren Reisekrankheit leiden (Abbildung 30).

### Schwere der Reisekrankheit

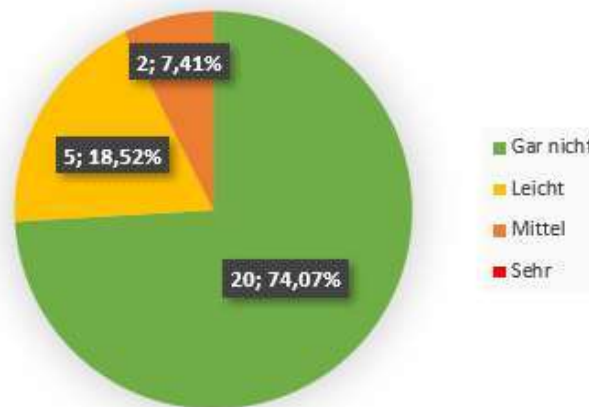


Abbildung 30: Schwere der Reisekrankheit der erfolgreich teilgenommenen Probanden

Zur Beantwortung der Validierungsfrage und Validierungshypothese aus Kapitel 4.1 werden die entsprechenden Kategorien der Fragebögen analysiert und im nachfolgenden Kapitel dargestellt.

## 4.5 Untersuchung der subjektiven Kriterien

Zur Berechnung signifikanter Unterschiede zwischen den Fahrprofilen wird die Stichprobengröße  $N = 27$  bzw. für die jeweilige Reihenfolge  $N = 16$  und  $N = 11$  berücksichtigt. Hierzu ist das Konfidenzintervall  $CI$  zu berücksichtigen, welches für optimistische Aussagen auf ein Vertrauensniveau von 90 % gesetzt wird (*t-Test, Chi-Quadrat, ANOVA, Regression, Korrelation...*, o. J.). Basierend auf dem kritischen Wert  $t_c$  und dem Signifikanzniveau  $p$  ermöglicht der t-Test die Feststellung der Signifikanz. Hierbei gilt, wenn  $p < 0,05$  ist, liegt eine einseitige Signifikanz vor und die Nullhypothese gilt als bestätigt. Die Darstellung der Auswertungen der Analyse erfolgt aufgrund einer besseren Übersichtlichkeit in mehreren Schritten (die Auswertung kann Anhang E entnommen werden): Zunächst wird auf die Akzeptanzgüte des Fahrradsimulators eingegangen.

### Auswertung Akzeptanz

Zum Beweis der Hypothese, dass die längsdynamischen Leistungsverbesserungen eine Erhöhung der Akzeptanz des Simulators hervorrufen, werden die Ergebnisse des Akzeptanzfragebogens interpretiert. Dieser setzt sich aus neun Fragen zu Akzeptanzattributen zusammen und wurde nach Abschluss jedes Fahrprofils beantwortet, wobei die positiven Eigenschaften oberhalb der Mittellinie angetragen sind (Van Der Laan et al., 1997). Die Bewertungsskalierung nach Van der Laan umfasst einen Bereich von -2 bis +2. Das neue Fahrprofil wurde bei der Mehrheit der Fragen (fünf von neun) positiver bewertet (Abbildung 31).

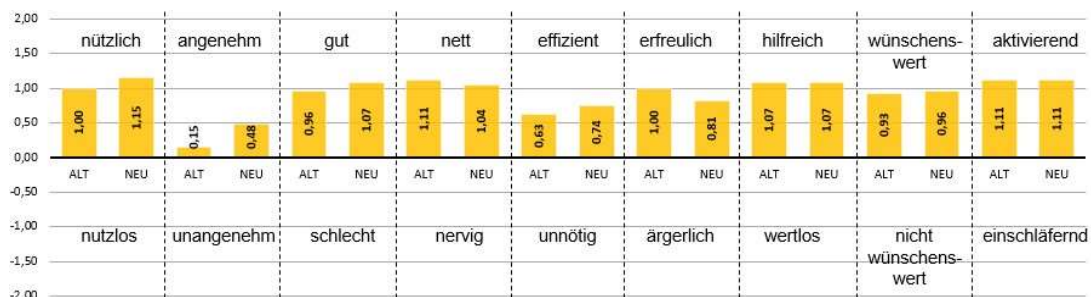


Abbildung 31: Auswertung Akzeptanzgüte

Zudem wird die optimierte Variante in Bezug auf das Akzeptanzattribut *angenehm* signifikant höher bewertet (Alt: 0,15; Neu: 0,48;  $p = 0,042$ ). Das alte Fahrprofil empfanden die Probanden lediglich bei zwei Teilbereichen besser, beim Attribut *erfreulich* ist zusätzlich eine Signifikanz festzustellen (Alt; 1,00; Neu: 0,81;  $p = 0,029$ ) (Abbildung 32).

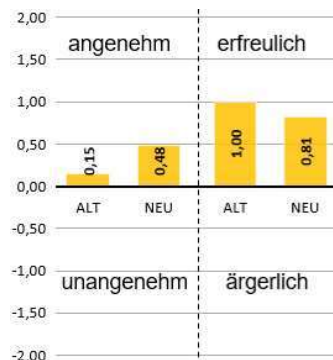


Abbildung 32: Signifikante Akzeptanzattribute

Bei den zu bildenden Nützlichkeits- und Zufriedenheitsgraden basierend auf den Mittelwerten von vier bzw. fünf Akzeptanzattributen lässt sich ebenfalls eine Tendenz zur optimierten Variante erkennen (Abbildung 33).

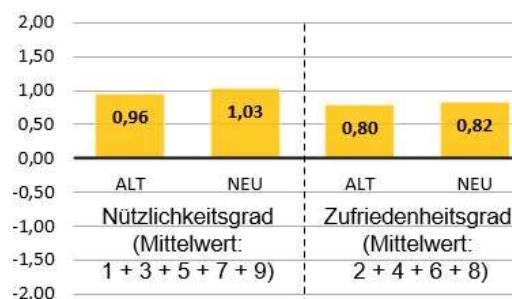


Abbildung 33: Auswertung Nützlichkeits- und Zufriedenheitsgrad

Der Vergleich unter Berücksichtigung der Fahrprofilreihenfolge zeigt, dass das neue Fahrprofil (wenn dies am Ende stand) sowohl bei allen Einzelattributen als auch bei der Gesamtauswertung (überwiegend signifikant) besser abschnitt (Abbildung 34 und Abbildung 35).

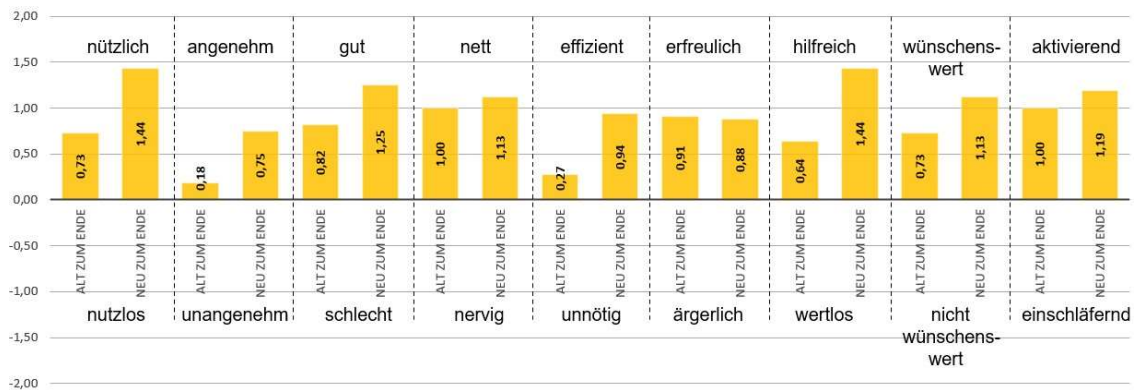


Abbildung 34: Auswertung Akzeptanzgüte nach Reihenfolge

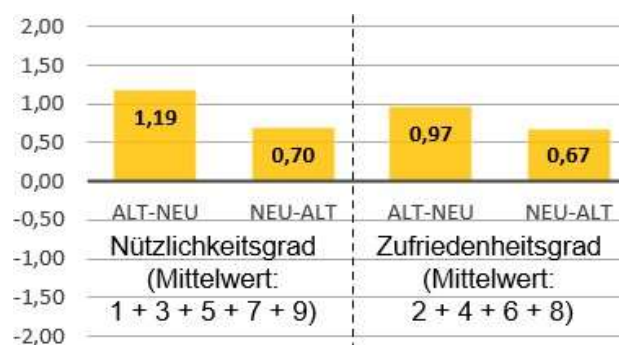


Abbildung 35: Auswertung Nützlichkeits- und Zufriedenheitsgrad nach Reihenfolge

### Auswertung Realitätsgrad

Im weiteren Schritt wird die Auswertung der Realitätsgüte vorgenommen, wobei mit den Ergebnissen des Fragebogens nach jedem Durchgang begonnen wird. Die Skalierung beinhaltet eine 7-Punkte-Einteilung und je höher der ermittelte Wert, desto höher der erreichte Realitätsgrad. Auf Grundlage der gesamtheitlichen Betrachtungsweise lässt sich erkennen, dass die Beurteilung hinsichtlich einer realitätsgetreuen Fahrgeschwindigkeit geringfügig schlechter als gegenüber dem alten Fahrprofil ausfiel (Abbildung 36).

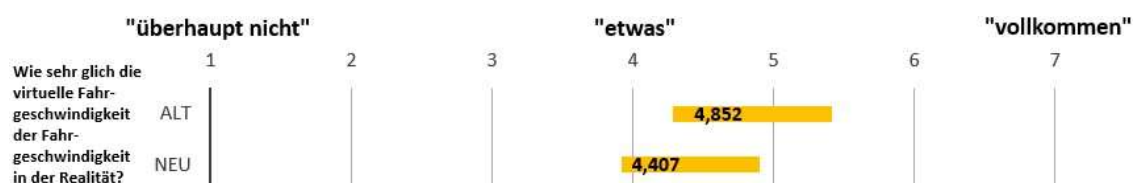


Abbildung 36: Auswertung Realismus Fahrgeschwindigkeit

Die visuellen Beschleunigungsvorgänge sind hingegen mit dem neuen Fahrprofil besser, d.h. als realistischer, empfunden worden (Abbildung 37). Hierbei stufen die VPs vor allem die Simulation von Bremsvorgängen (Alt: 4,778; Neu: 5,370;  $p = 0,027$ ) signifikant realitätsgetreuer gegenüber dem alten Fahrprofil ein.

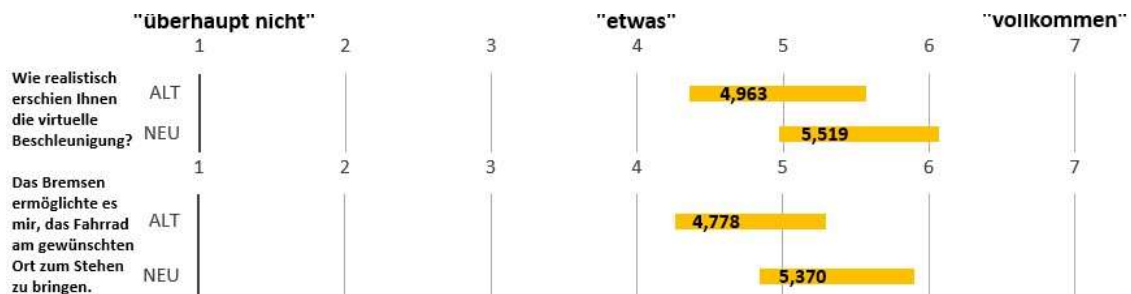


Abbildung 37: Auswertung Realismus Beschleunigungsvorgänge

Der größte Unterschied ergab sich bei der Wahrnehmung des geschwindigkeitsabhängigen Fahrtwinds. Die Auswertung (Abbildung 38) zeigt einen signifikanten Anstieg der Realitätsbewertung gegenüber dem statischen Fahrtwind im Ausgangszustand (Alt; 3,889; Neu: 5,000;  $p = 0,0002$ ).

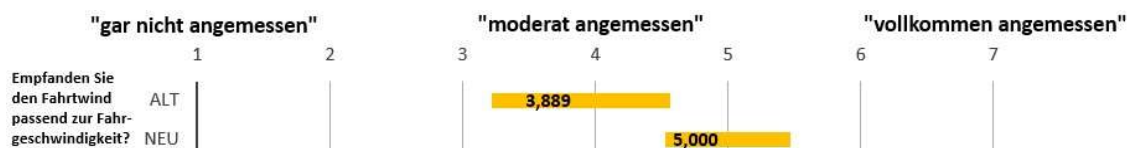


Abbildung 38: Auswertung Realismus Fahrtwind

Die Signifikanzbewertung ist in Tabelle 7 ersichtlich, wobei das signifikante Fahrprofil inklusive der Force-Feedback-Komponente grün hinterlegt ist.

Tabelle 7: Auswertung Signifikanzniveau des Realismus nach Fahrprofilen

Force-Feedback-Komponente	Fahrprofil Alt $\bar{X}$	Fahrprofil Neu $\bar{X}$	Signifikanzniveau $p$
Beschleunigungsvorgänge	4,963	5,519	0,147
Fahrtwind	3,889	5,000	0,0002
Fahrgeschwindigkeit	4,852	4,407	0,092
Bremsvorgänge	4,778	5,370	0,027
Stärke der Bremsen	3,852	4,111	0,198

Die Antworten im Abschlussfragebogen, in dem der direkte Vergleich der beiden Fahrprofile angestellt werden sollte, ergibt sich die identische Bewertungsreihenfolge der längsdynamischen Force-Feedback-Komponenten (Abbildung 39). In der Darstellung ist ersichtlich, dass der Fahrtwind sowie die Bremsvorgänge der optimierten Version als realistischer wahrgenommen wurden. Hingegen Beschleunigungsvorgänge und Fahrgeschwindigkeit nahezu gleich bewertet werden.

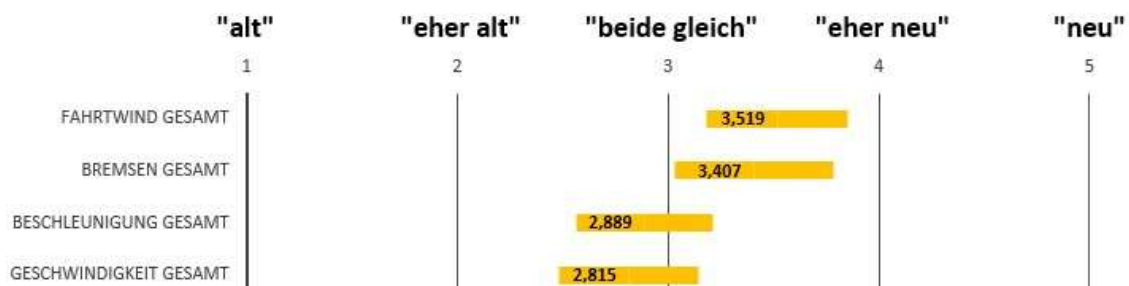


Abbildung 39: Auswertung Realismus Abschlussfragebogen

Des Weiteren wurden anhand des Abschlussfragebogens die signifikanten Differenzen innerhalb der längsdynamischen Modulen berechnen. Die einzelnen längsdynamischen Force-Feedback-Komponenten wurden hierzu untereinander verglichen, um den größten Einfluss auf die Realitätsgüte zu ermitteln (Tabelle 8). Das jeweils signifikante System ist in der Tabelle grün eingefärbt.

Tabelle 8: Auswertung Signifikanzniveau des Realitätsgrades beim Abschlussfragebogen

Force-Feedback-Komponente	Mittelwert $\bar{x}$	Signifikanzniveau $p$
Fahrtwind	3,519	0,315
Bremsen	3,407	
Fahrtwind	3,519	0,006
Beschleunigung	2,889	
Fahrtwind	3,519	0,004
Fahrgeschwindigkeit	2,815	
Bremsen	3,407	0,008
Beschleunigung	2,889	

Bremsen	3,407	0,009
Fahrgeschwindigkeit	2,815	
Beschleunigung	2,889	0,332
Fahrgeschwindigkeit	2,815	

Der Realitätsgrad der gesamten Testumgebung sollte anhand der Frage nach dem allgemeinen Fahrgefühl bewertet werden. Es ist zu erkennen, dass jeweils das zuletzt gefahrene Setup besser bewertet wurde und keine verallgemeinerte Aussage getroffen werden kann (Abbildung 40).

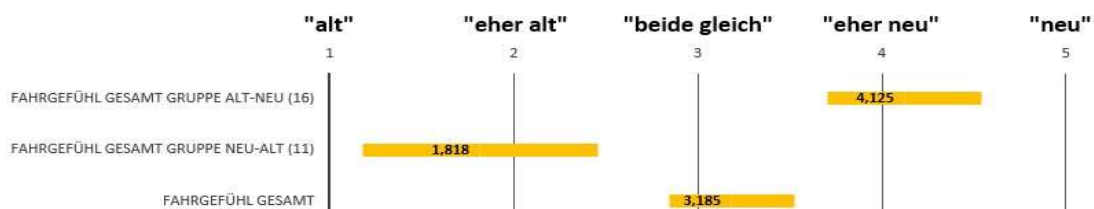


Abbildung 40: Auswertung Realismus Fahrgefühl

Als finalen Schritt der Untersuchung wird der Grad der Simulatorkrankheit bestimmt. Hierzu werden die Angaben der Testpersonen zum einen in Abhängigkeit des Fahrprofils und zum anderen in Relation der Reihenfolge ausgewertet und entsprechend des SSQ mit den jeweiligen Faktoren der Teilbereiche ermittelt (Kennedy et al., 1993, S. 212).

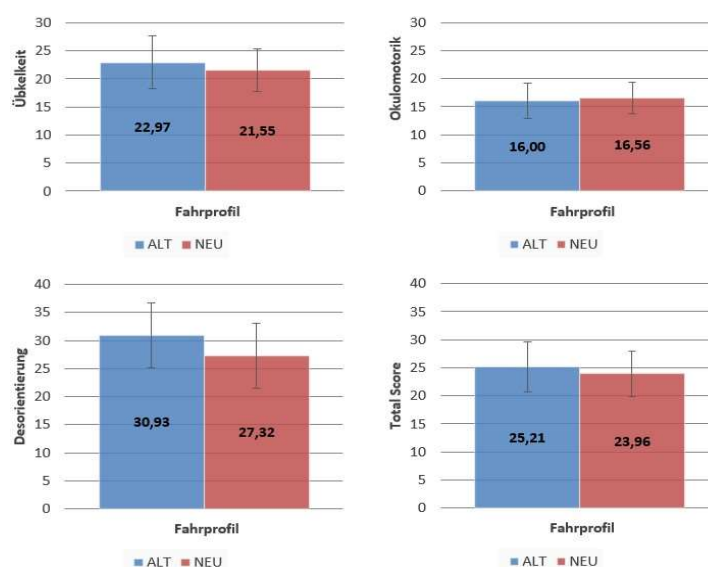


Abbildung 41: Auswertung SSQ bezüglich Fahrprofil

Auf Grundlage der profilabhängigen Angaben (Abbildung 41) ist eine geringere und somit positivere Bewertung für das neue Fahrprofil ersichtlich. Lediglich in dem Teilbereich Okulomotorik liegt eine gering höhere Punktzahl vor.

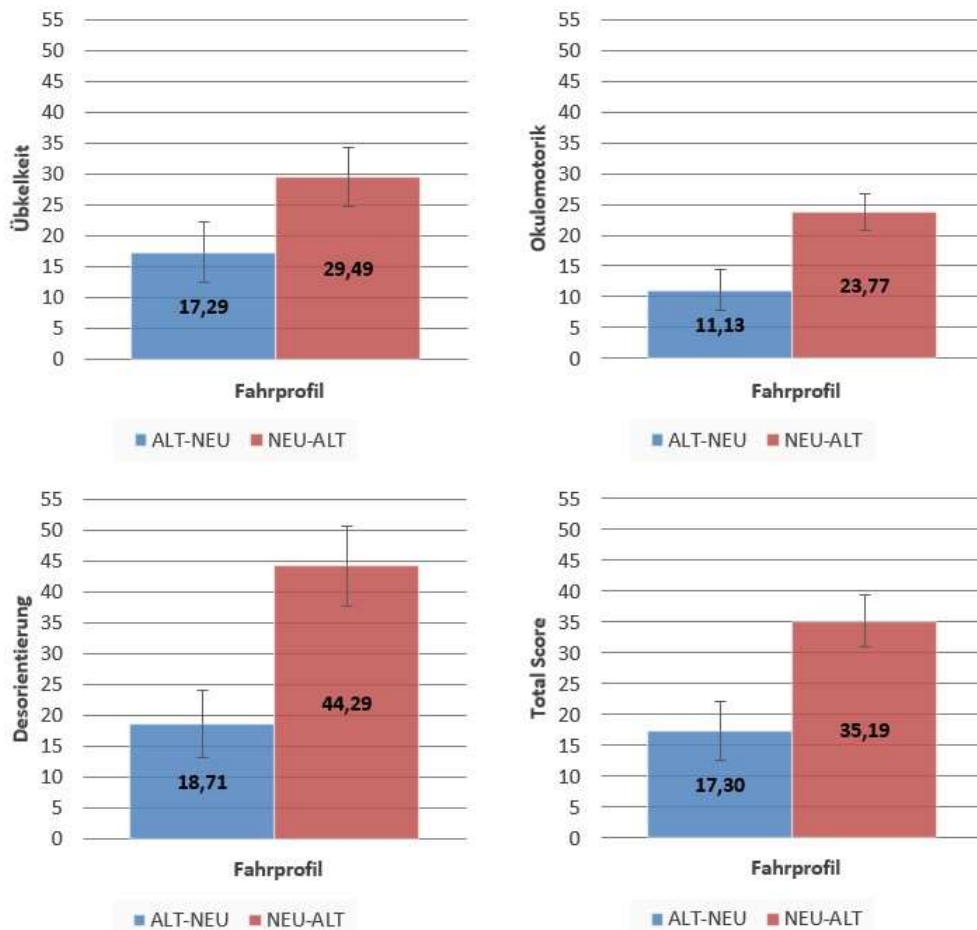


Abbildung 42: Auswertung SSQ bezüglich Reihenfolge

Bei Betrachtung der unterschiedlichen Fahrprofilreihenfolge wird deutlich (Abbildung 42), dass die Probanden des Durchgangs Neu-Alt einen signifikanten Anstieg aller Simulatorkrankheit-Symptome erfuhren. Im Vergleich liegen die Auswertungen bezüglich der Reihenfolge Alt-Neu überwiegend bei der Hälfte der Punktzahlen.

## 5 Schlussfolgerung

Diese Arbeit verfolgte die Hauptzielsetzung, eine technische Weiterentwicklung der Längsdynamik-Komponenten eines Fahrradsimulators zu erreichen. Vor diesem Hintergrund wurden drei Simulator-Teilsysteme, welche zum längsdynamischen Force Feedback beitragen, hinsichtlich ihrer Simulationsgüte analysiert. Folglich konnten Optimierungspotenziale identifiziert werden, welche die Zielvorgaben der Konzeptüberarbeitung darstellten. Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Konzeptumsetzung kurz zusammengefasst. Darüber hinaus wird die Gütesteigerung den Erkenntnissen aus der Probandenstudie gegenübergestellt, um den Einfluss der Modifikationen auf das subjektive Empfinden des Simulators darzustellen.

### 5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die stockende Simulation von Beschleunigungsvorgängen war der Hauptanlass für die Überarbeitung der Geschwindigkeitserfassung. Zum einen konnte dies auf eine niedrige Datenübertragungsgeschwindigkeit der BLE-Funkübertragung zurückgeführt werden, zum anderen ließ sich eine geringe Auflösung des eingebauten Messverfahrens feststellen. Die in Kap. 3.6 dargestellte Konzeptoptimierung beschreibt die Implementation eines Inkrementalwertgebers, sowohl auf Hardwareebene, als auch auf Softwareebene. Der quantitative Vergleich der Leistungswerte zeigt hinsichtlich der Messauflösung eine Steigerung um das 683-fache. Zusätzlich konnte durch die leitungsgebundene Datenübertragung die maximale Übertragungsgeschwindigkeit um mehr als das 10-fache erhöht werden. Hierdurch reduzierte sich die Laufzeitdauer der Berechnungsroutine von 300 ms auf 10 ms. Die objektive Vergleichsmessung (Kap. 3.9) lässt erkennen, dass mithilfe der optimierten Hard- sowie Software eine gesteigerte Abtastrate der Geschwindigkeitswerte erreicht wird, was eine flüssige Visualisierung der Beschleunigungsmanöver ermöglicht.

Des Weiteren wurde die Optimierung des mechanischen Bremssystems als Zielsetzung definiert. Da das Anforderungsprofil eine Beibehaltung des Rollentrainers bedingt, musste ein individuelles Bremsensystem entwickelt werden, das eine verstärkte Verzögerung des Schwungrads hervorruft. Die Konzeptumsetzung (Kap. 3.6.3) beruht auf dem Einsatz einer Scheibenbremse. Durch eine eigens entwickelte Montagevorrichtung kann das Bremsmoment gemäß dem Anforderungsprofil über zwei Bremshebel auf die Scheibenbremse übertragen werden. Der qualitative Konzeptvergleich zeigt, dass durch die Konzeptüberarbeitung eine 3,8-mal höhere Verzögerungsleistung realisiert werden konnte.

Ein weiteres Arbeitsergebnis stellt der geschwindigkeitsgesteuerte Fahrtwind dar. Auf Basis eines einheitlichen Funknetzstandards ANT+, welches sowohl im Headwind-Simulator als auch im Rollentrainer integriert ist, konnte eine Kopplung der beiden Module initiiert werden. Hierdurch dienen die Sensordaten der ursprünglichen Geschwindigkeitsmessung zur Steuerung der Fahrtwindstärke.

## **5.2 Interpretation der Ergebnisse**

Mit der erfolgreichen Umsetzung der zuvor ausgearbeiteten Optimierungsentwürfe wurden die primären Zielvorgaben dieser Arbeit erreicht.

Darüber hinaus wurde anhand einer Probandenstudie die erweiterte Zielsetzung hinsichtlich der Steigerung der Simulationsgüte untersucht. Die Ergebnisinterpretation verfolgt die Beantwortung folgender Fragestellungen: Zum einen wurde der Hypothese, die als vorläufige Annahme eine Akzeptanzsteigerung durch die längsdynamischen Optimierungen formuliert (VH1), nachgegangen, zum anderen wurde untersucht, welche der implementierten Modifikation die größte Wirksamkeit zur Verbesserung des Realitätsgrades besitzt (VF1).

Zum Beweis der Hypothese werden die Ergebnisse des Akzeptanzfragebogens interpretiert. Das neue Fahrprofil wurde bei der Mehrheit der Fragen (5 von 9) positiver bewertet, wobei die optimierte Variante in Bezug auf das

Akzeptanzattribut *angenehm* signifikant höher bewertet wurde. Ein weiteres Indiz, was für die Bestätigung der Hypothese spricht, lässt sich bei Betrachtung der unterschiedlichen Fahrprofilreihenfolge ableiten. Der Vergleich beider Fahrprofile, wenn diese jeweils am Ende gefahren wurden, zeigt, dass das neue Fahrprofil bei 8 von 9 Fragen (überwiegend signifikant) besser abschnitt. In Anbetracht, dass die Probandenmeinung erfahrungsgemäß mit anhaltender physischer sowie psychischer Belastung durch die Studie immer stärker negativ beeinträchtigt wird, spricht dies im weiteren Sinn für einen Beleg der Hypothese. Da im Umkehrschluss die neue Konfiguration zum Anfang einer Studiendurchführung mehrheitlich weniger Zuspruch erhielt, lassen sich nach Gesamtauswertung der Akzeptanzfragen keine erheblichen Unterschiede feststellen. Es ist tendenziell eine Akzeptanzsteigerung vom alten zum neuen Fahrprofil zu erkennen, jedoch sind die Unterschiede hinsichtlich Nützlichkeitsgrad und Zufriedenheitsgrad nicht signifikant. Zudem muss berücksichtigt werden, dass der Einfluss von den Anpassungen der Querdynamik mit den allgemeinen Fragen zur Akzeptanz nicht herausgearbeitet werden kann. In Bezug auf die Akzeptanzbeurteilung konnte die Erhebung nur eine geringe Differenzierbarkeit zwischen Ausgangszustand und Überarbeitungsstand des Simulators ermitteln. Die Validierungsstudie lässt letztendlich keine verallgemeinerten Aussagen zur Akzeptanzsteigerung infolge der Längsdynamik Optimierungen zu, weshalb die Validierungshypothese nicht eindeutig belegt werden kann.

Zudem wurde untersucht, ob und inwiefern die längsdynamischen Änderungen einen positiven Effekt zur Steigerung des Realitätsgrades des Fahrradsimulators haben. Nach Auswertung der Datensätze ist zunächst hervorzuheben, dass die Antworten aus den übergreifenden Fragebögen dem gleichen Bewertungsmuster folgen. Sowohl bei der Einzelbeurteilung als auch beim abschließenden Vergleich der Fahreigenschaften zeichnete sich die gleiche Rangfolge innerhalb der Längsdynamik-Kriterien ab. Dies ist insofern bemerkenswert, da die Probanden zu keinem Zeitpunkt Informationen über Änderungen am Simulator-Fahrverhalten erhielten. Die Gesamtauswertung zeigt, dass die visuelle Fahrgeschwindigkeit beim optimierten Stand als geringfügig unrealistischer wahrgenommen wird als gegenüber dem alten Fahrprofil. Bei Beschleunigungsvorgängen konnte

hingegen ein höherer Wert für den Realitätsgrad der optimierten Version festgestellt werden. Hierbei empfanden die Probanden vor allem die Simulation von Bremsvorgängen signifikant realistischer gegenüber dem alten Fahrprofil. Der größte Steigerungseffekt ergab sich allerdings hinsichtlich der Wahrnehmung des geschwindigkeitsabhängigen Fahrtwinds. Zum einen zeigt die Auswertung einen signifikanten Anstieg der Realitätsbewertung gegenüber dem statischen Fahrtwind im Ausgangszustand. Darüber hinaus lassen sich signifikante Differenzen im Vergleich zu anderen längsdynamischen Bewertungskriterien (wie Fahrgeschwindigkeit und Beschleunigung) ablesen. Anhand der Antworten zum Realismus konnte somit ein Teilaspekt der Validierungsfrage beantwortet werden. Hiernach hat der dynamisch gesteuerte Fahrtwind die größte Auswirkung zur Steigerung des Realitätsgrades.

Die Frage, ob infolge der längsdynamischen Änderungen ein verbesserter Realitätsgrad der gesamten Simulationsumgebung erreicht wird, kann anhand der Studie nicht pauschal beantwortet werden. Die geringe Differenzierbarkeit der Fahrprofile kann auf mehrere Ursachen zurückgeführt werden. Zum einen ist ein starker Einfluss der Fahrprofilreihenfolge zu erkennen, welcher mit dem Trainingseffekt der Probanden einher geht. Dies spiegelt sich vor allem in der Beantwortung der verallgemeinerten Frage nach dem Fahrgefühl des Simulators wider. Demnach wurde jeweils das zuletzt gefahrene Fahrprofil (egal ob alt oder neu) als realistischer empfunden. Weitere Gründe, die eine fehlende Signifikanz einiger Ergebnisse verursacht, lassen sich auch in einer geringen Teststärke der Studie vermuten. Neben der Stichprobengröße, die mit 27 Probanden zu gering ausfiel, um weitere Effekte aufzudecken, muss die Gestaltung der Fahrszenarien kritisch hinterfragt werden. Die Fahrszenarien haben häufig nicht die erforderlichen Fahrmanöver der Probanden provoziert, weshalb diese erst gar nicht in die Lage versetzt wurden, Unterschiede zwischen den Fahrprofilen feststellen zu können. Darüber hinaus wurde die Validierungsstudie gleichzeitig zur Erforschung von neuentwickelten Dynamikmodellen, welche zur Verbesserung der Querdynamik beitragen sollten, genutzt. Da dies einen großen Einflussfaktor auf das Erleben des Simulators darstellt, kann keine generalisiertere Bezug zwischen Längsdynamik und der gesamtheitlichen Realitätsgüte aufgestellt werden. Eine

weitere Ursache, die auf einen Zusammenhang mit dem geringen Realitätsgrad der Fahrgeschwindigkeit schließen lässt, könnte die defekte Gangschaltung in Verbindung mit der Geschwindigkeitsberechnung des Rollentrainers sein. Da die Probanden nicht hochschalten konnten um schneller zu fahren, ist anzunehmen, dass das alte Fahrprofil aufgrund der Ausgabe einer höheren Grundgeschwindigkeit realistischer bewertet wurde.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel behandelt abschließend die Erkenntnisse dieser Arbeit und gibt Vorschläge für weitere Forschungsvorhaben.

### 6.1 Zusammenfassung

Das Hauptaugenmerk dieser Thesis liegt darauf, die Darstellung der Längsdynamik eines am DLR-Institut TS-VUV entwickelten Fahrradsimulators zu überarbeiten und dadurch die Einsetzbarkeit in einer Multi-User-Simulationsumgebung, welche u.a. zur Erprobung von Fahrerassistenzsystemen dient, zu steigern. Die Simulationsgüte lässt sich vorwiegend anhand einer ausreichend hohen Realitätsnähe bemessen, welche durch die Schaffung eines immersiven Fahrerlebnis dazu beiträgt, die Validität der Testumgebung zu steigern. Vor diesem Hintergrund wurde die Überarbeitung der zur Wahrnehmung des längsdynamischen Fahrradverhaltens verwendeten Teilsysteme als Hauptzielsetzung definiert. Die zentralen Schritte dieser Arbeit sind die Ausarbeitung von Optimierungsansätzen, die Entwicklung und die Umsetzung der Konzeptanpassungen der Force-Feedback-Systeme sowie die Durchführung einer Probandenstudie. Hierzu wurde zunächst eine Literaturrecherche zu Antriebskräften beim Fahrrad und zu bisherigen Erkenntnissen im Bereich von Fahr- bzw. Fahrradsimulatoren durchgeführt. Zudem wurde die multisensorische Verarbeitung vestibulärer und optischer Reize hinsichtlich der Bewegungseindrücke in Simulatoren näher beleuchtet. Aus theoretischen Gesichtspunkten und unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingung konnte nach einer Analyse der Ausgangskonfiguration ein Anforderungsprofil definiert werden. Zur verzögerungsfreien Echtzeitsimulation von Beschleunigungsvorgängen erfolgte unter Verwendung eines Drehgebers eine Qualitätssteigerung der Geschwindigkeitserfassung. Das überarbeitete Messverfahren zeichnet sich durch eine um das 30-fache gesteigerte Abtastfrequenz aus, welche zu einer präzisen Synchronisation zwischen der physischen

und virtuellen Darstellung des Fahrrads führt. Eine zusätzliche Leistungssteigerung stellt die Bremskraftverstärkung dar. Die verlängerte Schwungradwelle des Rollentrainers in Kombination mit einer individuell entwickelten Montagevorrichtung ermöglicht die hydraulische Ansteuerung einer Scheibenbremse mit zwei Bremshebel. Die Modifizierung des Force-Feedback-Elements sorgt für eine 3,8-fache Erhöhung der Verzögerungsleistung. Eine weitere Maßnahme, die für ein immersiveres Fahrgefühl sorgen soll, beschreibt die geschwindigkeitsabhängige Fahrtwindsteuerung. Diese konnte mittels einer gemeinsamen Funkübertragungsschnittstelle (ANT+) und anschließender Kopplung zwischen Rollentrainer und Bodenventilator erzielt werden.

Die Tauglichkeit der Konzeptüberarbeitungen in Bezug auf eine verbesserte Bewegungswahrnehmung war mit Durchführung einer Probandenstudie zu validieren. Die Subjektivbeurteilung hinsichtlich Realitätsgrad und Akzeptanz erfolgt anhand einer zuvor definierten Validierungsfrage bzw. -hypothese.

Die Auswertung der Antworten des Akzeptanzfragebogens lässt zwar eine tendenziell gestiegene Akzeptanzwahrnehmung der Probanden vermuten. Hierbei ist die Bewertung jener Probandengruppe hervorzuheben, welche das überarbeitete Fahrprofil als letztes fuhren und es, trotz zunehmender Studienbelastung, deutlich besser empfanden. In Anbetracht der Gesamtauswertung sind die Unterschiede hinsichtlich Nützlichkeitsgrad und Zufriedenheitsgrad jedoch nicht signifikant. Zudem kann der Einfluss des geänderten Querdynamikmodell auf die generelle Akzeptanzwahrnehmung nicht identifiziert werden. Demnach kann durch die Validierungsstudie keine verallgemeinerte Aussage zu einer Akzeptanzsteigerung infolge der Längsdynamik Optimierungen getroffen werden, weshalb die Validierungshypothese nicht eindeutig zu belegen ist.

Die erweiterte Validierung stellt die Frage nach einem gesteigerten Realitätsgrad dar. Obwohl in der Blindstudie hinsichtlich des Realismus unterschiedliche Fragestellungen erarbeitet wurden, bildete sich bei der Bewertung eine Rangfolge innerhalb der Merkmale zur Längsdynamik ab. Demzufolge hat der, in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit, gesteuerte Fahrtwind die größte Wirkung zur Steigerung des Realitätsgrades. Mit dieser Erkenntnis konnte ein Teilaspekt der

Validierungsfrage beantwortet werden. Die Frage, ob sich infolge der längsdynamischen Änderungen ein verbesserter Realitätsgrad der gesamten Simulationsumgebung abzeichnet, kann aufgrund der geringen Differenzierbarkeit der Studienergebnisse nicht pauschal beantwortet werden. Ursachen hierfür lassen sich zum einen in der geringen Teststärke bzgl. Stichprobengröße und Szenarien Gestaltung vermuten. Des Weiteren hatten technischen Probleme wie bspw. eine defekte Gangschaltung negativen Einfluss auf die Fahrbarkeit des Simulators. Anhand von verschiedenen Probanden-Kommentaren, wonach die Bremsanlage eine zu große Griffigkeit erzeugt, können weitere Ursachen für die uneindeutigen Ergebnisse darstellen.

Zwar wird die Tauglichkeit der Optimierungen anhand der Subjektivbeurteilung nicht eindeutig belegt, sollte ausgehend weiterer Forschungen allerdings näher untersucht werden. Jedoch ist festzuhalten, dass durch die Leistungssteigerungen aller längsdynamischen Systeme eine grundsätzliche Verbesserung der Testumgebung erreicht wurde. Die durchgeführten Analysen zeigen, dass die gestellten Zielsetzungen an die Konzeptoptimierungen durch konsequente Umsetzung der Konzeptideen vollständig erfüllt wurden.

## **6.2 Ausblick**

Die Tauglichkeit des Fahrradsimulators drückt sich vor allem durch eine genügend hohe Realitätsnähe, d.h. einer möglichst genauen Nachbildung der in der Realität wahrzunehmenden Sinnesreize, aus. Mit der Überarbeitung des längsdynamischen Force-Feedback-Konzepts und den Erkenntnissen der Subjektivbeurteilung in Form einer Probandenstudie leistet diese Arbeit einen Beitrag zur Verbesserung der Testumgebung. Der Beitrag der Optimierungen besteht überwiegend darin, die Einsetzbarkeit des Simulators im Rahmen der Multi-User-Simulation erhöht zu haben. Ein Beispiel hierfür ist die in der Präzision gesteigerte Synchronisation zwischen der physischen und der visuellen Umgebung während Beschleunigungsvorgänge. Dies kann die Tendenz zur Simulatorkrankheit

verringern und somit die Validität sowie die Reliabilität von weiteren Forschungsvorhaben positiv beeinflussen. Die gesteigerte Simulationsgüte in Verbindung mit den gesammelten Erkenntnissen bezüglich der Probandenwahrnehmung helfen indirekt die Erprobungsqualität bei Fahrerassistenzsystem zu erhöhen. Mit den Validierungserkenntnissen lassen sich zudem die Einflüsse der Längsdynamikcharakteristika qualitativ gegenüberstellen, woraus sich eine zielgerichtete Auslegung vergleichbarer Testumgebungen ableiten lässt.

Zur weiteren Steigerung der Tauglichkeit hinsichtlich der immersiven Simulatorwahrnehmung sollten in weiterführenden Forschungen u.a. die folgenden technischen Weiterentwicklungen realisiert und analysiert werden:

- Pedalbewegungen in VR-Umgebung bspw. durch sensorisches Innenlager simulieren (Kapitel 3.6.1)
- Force Feedback ausgehend von vertikalen Beschleunigungen durch verschiedene Straßenbeschaffenheiten, wie Asphalt, Feldwege, Kopfsteinpflaster, etc., umsetzen
- Realisierung von Steigungen und Neigungen mittels Bewegungsplattform

Zur Erzielung aussagekräftigerer Validierungsstudien sollten ebenfalls Verbesserungen implementiert werden. Mögliche studienbezogene Optimierungen wären u.a.:

- Erhöhung der Stichprobengröße
- Validierungsstudien ausschließlich für einzelne Anpassungen auslegen, um konkrete Ergebnisse zu erzielen
- Nähere Aufklärung der Probanden über Studienhintergrund

## Literaturverzeichnis

Allen, R., Rosenthal, T., & Cook, M. L. (2011). A short history of driving simulation. In *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology* (S. 2–1).

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>

Artmann, U., Beck, F., Bellersheim, R., Brust, E., Gressmann, M., Herkendell, F., & Kindt, H. (2019). *Fachkunde Fahrradtechnik* (7. Aufl.). Verlag Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer GmbH & Company KG.

Ashton, W. D. (1966). *THE THEORY OF ROAD TRAFFIC FLOW*. <https://trid.trb.org/view/115214>

Barjonet, P.-E. (Hrsg.). (2001). *Traffic Psychology Today*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6867-1>

Basler, S. (2016). *Encoder und Motor-Feedback-Systeme*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-12844-9>

Bertin, R. J. V., Collet, C., Espié, S., & Graf, W. (2005). Objective Measurement of Simulator Sickness and the Role of Visual-Vestibular Conflict Situations. *North America*, 14.

Breuer, B., & Bill, K. H. (Hrsg.). (2012). *Bremsenhandbuch: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik*. Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2225-3>

Caird, J. K., & Horrey, W. J. (2011). *Twelve Practical and Useful Questions about Driving Simulation*. <https://trid.trb.org/view/1114404>

Castro, C. (2008). *Visual Demands and Driving* (S. 1–29).

de Winter, J., Leeuwen, P. M., & Happee, R. (2012, Januar 1). *Advantages and Disadvantages of Driving Simulators: A Discussion*.

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>

*DLR - Institut für Verkehrssystemtechnik—MoSAIC*. (o. J.). Abgerufen 24. November 2022, von <https://www.dlr.de/ts/desktopdefault.aspx/tabid-18740/>

Dörner, R., Broll, W., Grimm, P., & Jung, B. (Hrsg.). (2013). *Virtual und Augmented Reality (VR / AR)*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-28903-3>

Dynastream Innovations Inc. (Hrsg.). (2014). *Ant / ant+ defined*.

Dziuda, Ł., Biernacki, M. P., Baran, P. M., & Truszczyński, O. E. (2014). The effects of simulated fog and motion on simulator sickness in a driving simulator and the duration of after-effects. *Applied Ergonomics*, 45(3), 406–412. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.05.003>

*E201 USB encoder interface—Www.rls.si*. (o. J.). Abgerufen 16. Dezember 2022, von <https://www.rls.si/eng/e201-usb-encoder-interface-123?partNumbers=E2019Q>

García, D. M., & Gröne, K. (2022a). *Datenauswertung*. DLR Wiki. Abgerufen 16. Dezember 2022, von <https://wiki.dlr.de/pages/viewpage.action?spaceKey=TSSim&title=Datenauswertung>

García, D. M., & Gröne, K. (2022a). *Fahrprofile*. DLR Wiki. Abgerufen 16. Dezember 2022, von <https://wiki.dlr.de/display/TSSim/Fahrprofile+bzw.+Programme>

García, D. M., & Gröne, K. (2022b). *Szenarien*. DLR Wiki. Abgerufen 16. Dezember 2022, von <https://wiki.dlr.de/display/TSSim/Szenarien+BikeEval2>

García, D. M., & Gröne, K. (2022c). *Versuchsplan*. DLR Wiki. Abgerufen 16. Dezember 2022, von <https://wiki.dlr.de/display/TSSim/Versuchsplan+BikeEval2>

Garmin, & subsidiaries, G. L. or its. (o. J.). *Tacx FLUX 2 Smart-Trainer*. Garmin. Abgerufen 16. Dezember 2022, von <https://www.garmin.com/de-DE/p/690887>

Gupta, N. K. (2016). *Inside Bluetooth Low Energy, Second Edition*. Artech House.

*Inkrementalgeber / Inkremental-Drehgeber—Inkremental Drehgeber – flexibel im Einsatz | Hengstler GmbH*. (o. J.). Abgerufen 1. Dezember 2022, von [https://www.hengstler.de/de/s\\_c100302/Drehgeber/\\_Encoder/Inkrementalgeber/\\_Inkremental-Drehgeber/](https://www.hengstler.de/de/s_c100302/Drehgeber/_Encoder/Inkrementalgeber/_Inkremental-Drehgeber/)

*Introduction to Bluetooth Low Energy*. (o. J.). Adafruit Learning System. Abgerufen 13. Dezember 2022, von <https://learn.adafruit.com/introduction-to-bluetooth-low-energy/gatt>

Kemeny, A., & Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(1), 31–37. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(02\)00011-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(02)00011-6)

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](https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3)

*KICKR HEADWIND Smart-Ventilator für Radsport*. (o. J.). Wahoo Fitness. Abgerufen 16. Dezember 2022, von <https://de-eu.wahoofitness.com/devices/indoor-cycling/accessories/kickr-headwind-buy-eu>

Kováčsová, N., de Winter, J. C. F., Schwab, A. L., Christoph, M., Twisk, D. A. M., & Hagenzieker, M. P. (2016). Riding performance on a conventional bicycle and a pedelec in low speed exercises: Objective and subjective evaluation of middle-aged and older persons. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 42, 28–43. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.06.018>

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>

Lin, J. J.-W., Duh, H. B. L., Parker, D. E., Abi-Rached, H., & Furness, T. A. (2002). Effects of field of view on presence, enjoyment, memory, and simulator sickness in a virtual environment. *Proceedings IEEE Virtual Reality 2002*, 164–171. <https://doi.org/10.1109/VR.2002.996519>

Mehmood, N. Q., & Culmone, R. (2016). A Data Acquisition and Document Oriented Storage Methodology for ANT+ Protocol Sensors in Real-Time Web. *2016 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*, 312–318. <https://doi.org/10.1109/WAINA.2016.49>

Moltenbrey, M. (2020). Was ist Verkehr? In M. Moltenbrey, *Einführung in die Verkehrssimulation* (S. 3–3). Springer Fachmedien Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-28717-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-658-28717-7_2)

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

Moss, J. D., Austin, J., Salley, J., Coats, J., Williams, K., & Muth, E. R. (2011). The effects of display delay on simulator sickness. *Displays*, 32(4), 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2011.05.010>

Mourant, R. R., Rengarajan, P., Cox, D., Lin, Y., & Jaeger, B. K. (o. J.). THE EFFECT OF DRIVING ENVIRONMENTS ON SIMULATOR SICKNESS. *St ANNUAL MEETING*, 5.

Papelis, Y., & Ahmad, O. (o. J.). *A Comprehensive Microscopic Autonomous Driver Model for Use in High-Fidelity Driving*. 20.

Pausch, R., Crea, T., & Conway, M. (1992). A Literature Survey for Virtual Environments: Military Flight Simulator Visual Systems and Simulator Sickness. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(3), 344–363. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.3.344>

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>

Samson AG. (o. J.). *Serielle Datenübertragung*. Abgerufen 16. Dezember 2022, von <https://www.samsongroup.com/document/l153de.pdf>

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

Schmidt, R. F., & Schaible, H.-G. (2006). *Neuro- und Sinnesphysiologie* (5., neu bearbeitete Auflage). Springer Medizin Verlag.

Schnell, G. (Hrsg.). (1993). *Sensoren in der Automatisierungstechnik*. Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-663-13943-0>

Schriftleitung des „Aufstiegs“ (Hrsg.). (1964). *Wie sie sich emporarbeiteten: Idee und Tatkraft führen zum Erfolg*. Gabler Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-663-12880-9>

Serge, S. R., & Moss, J. D. (2015). Simulator Sickness and the Oculus Rift: A First Look. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 59(1), 761–765. <https://doi.org/10.1177/1541931215591236>

*SIG Webseite | Bluetooth® Technologie*. (o. J.). Website zur Bluetooth®-Technologie. Abgerufen 13. Dezember 2022, von <https://www.bluetooth.com/de/develop-with-bluetooth/join/>

Stewart, D. (1966). A Platform with Six Degrees of Freedom: A new form of mechanical linkage which enables a platform to move simultaneously in all six degrees of freedom developed by Elliott-Automation. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 38(4), 30–35. <https://doi.org/10.1108/eb034141>

*The Wireless Sensor Network Solution—THIS IS ANT*. (o. J.). Abgerufen 10. Dezember 2022, von <https://www.thisisant.com/>

*T-Test, Chi-Quadrat, ANOVA, Regression, Korrelation...* (o. J.). Abgerufen 16. Dezember 2022, von <https://datatab.de/tutorial/konfidenzintervall>

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)

Vollrath, M., & Krems, J. (2011). *Verkehrspsychologie: Ein Lehrbuch für Psychologen, Ingenieure und Informatiker* (1. Aufl). Kohlhammer.

VS Sensorik GmbH. (o. J.). *Magnetische Drehgeber: Drehgeber: Produkte: VS Sensorik GmbH*. Magnetische Drehgeber: Drehgeber: Produkte: VS Sensorik GmbH. Abgerufen 16. Dezember 2022, von <https://www.vs-sensorik.com/magnetische-drehgeber>

Wolfsteller, T. (1998). *Vorentwicklung eines Konzepts für die mechanische Speicherung und Rekuperation von Bremsleistung an Zweirädern*. Hochschule Zwickau.

Yin, S., & Yin, Y. (2007). 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>

*Zahl der weltweit verkauften Fahrräder*. (o. J.). [de.globometer.com](http://de.globometer.com). Abgerufen 10. November 2022, von <https://de.globometer.com/sport-fahrrad.php>

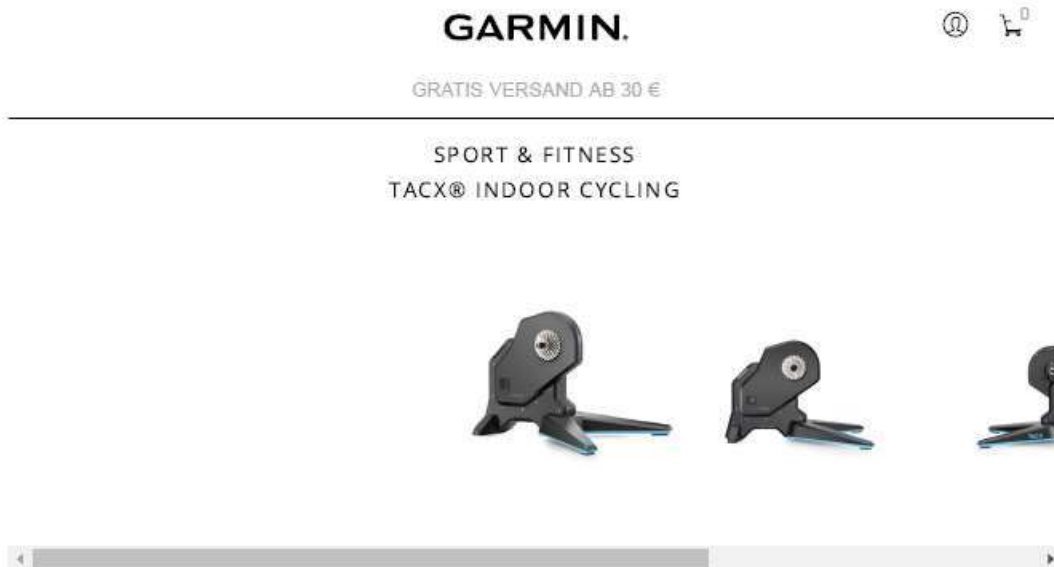
Zerbo, R. P., Filippo. (o. J.). *Sendix Base KIH40 Drehgeber Inkremental Produkt Details—Kübler Group—Germany*. Abgerufen 16. Dezember 2022, von <https://www.kuebler.com/de/produkte/messung/drehgeber/product-finder/produkt-details/KIH40>

## Anlagenverzeichnis

Anhang A – Datenblätter .....	- 1 -
Anhang B – Bauteilspezifikationen & Zeichnungen .....	- 29 -
Anhang C – Programmcode für Geschwindigkeitserfassung .....	- 32 -
Anhang D – Fragebögen .....	- 36 -
Anhang E – Auswertung der Validierungsstudie .....	- 60 -

# Anhang A – Datenblätter

## Tacx® FLUX 2 Smart-Trainer



## Tacx® FLUX 2 Smart-Trainer

ARTIKELNUMMER T2980.61

**799,00€**

Shoppe jetzt. Bezahle in bis zu 30 Tagen mit **Klarna**. [Mehr erfahren](#)

Inkl. MwSt, versandkostenfrei ab 30,00€

IN DEN WARENKORB

HÄNDLER SUCHEN

Versandfertig in ca. 5-8 Wochen.

Hinweis: Kassette nicht im Lieferumfang enthalten

### TECHNISCHE DATEN

#### Allgemein

ABMESSUNGEN

670 x 642 mm (26,4 x 25,3 Zoll)

GEWICHT	23,6 kg (52 lbs)
HÖHE	460 mm (18,1 Zoll)

## Konnektivität

DRAHTLOSE KOMMUNIKATION	ANT+-Konnektivität, drahtlose BLUETOOTH-Technologie
BEDIENUNG	Smartphone, Tablet, ANT+-Fahrradcomputer, autonom, Computerverbindung über ANT+-Antenne
AUSLESEGERÄTE	Fahrradcomputer, Computer mit ANT+-Antenne, Smartphone, Sportuhr, Tablet
VERBINDUNGSANZEIGE (ANT+/BLUETOOTH)	2 LEDs

## Indoor-Trainingsfunktionen

MAGNETE	8 Ferrit-Permanentmagnete und 8 Elektromagnete
ELEKTRISCHER ANSCHLUSS	110 bis 240 V
GEEIGNETE KASSETTEN	Standardmäßig (im Lieferumfang) Antriebskörper für Shimano und SRAM: 8- bis 11-fach. Für 12-fach bzw. andere Hersteller weitere Antriebskörper separat erhältlich: Campagnolo, SRAM XD und XD-R sowie Shimano Micro Spline; nicht geeignet für das Specialized SCS-System Kompatibel mit Kassetten bis 45 Zähne. Je nach Schaltwerk und Kettenlänge ggf. auch größer
GEEIGNETE AXSEN	Breite der Hinterradgabel: Rennrad: 130 mm, Mountainbike: 135 mm, 142 mm und 148 mm. Adapter für 135 x 10 mm verfügbar.
MAXIMALE LEISTUNG	2.000 Watt
MAXIMALE STEIGUNG	16 %
MAXIMALES DREHMOMENT	41 Nm
MAXIMALE BREMSKRAFT	120 N
SCHWUNGRAD	7,6 kg (16,8 lbs)
MASSENTRÄGHEIT	31,2 kg (68,8 lbs)
KALIBRIERUNG	Spin Down
AUSGABE	Geschwindigkeit, Trittfrequenz, Leistung
GENAUIGKEIT	< 2,5 %

GEMESSENE GESCHWINDIGKEIT	
GEMESSENE TRITTFREQUENZ	
GEMESSENE LEISTUNG	
Magnete	8 Ferrit-Permanentmagnete und 8 Elektromagnete
Übertragung	Keine
Elektrischer Anschluss	110 bis 240 Volt
Leistungsanzeige	Keine
Verbindungsanzeige (ANT+/Bluetooth)	2 LEDs
Geeignete Kassetten	Nicht geeignet für das Specialised SCS-System, Shimano und SRAM: 8- bis 11-fach. Campagnolo, SRAM XD und XD-R-Antriebskörper separat erhältlich. Kompatibel mit Kassetten bis 45 Zähne. Je nach Schaltwerk und Kettenlänge ggf. auch größer.
Geeignete Achsen	Breite der Hinterradgabel: Rennrad: 130 mm, Mountainbike: 135 mm, 142 mm und 148 mm. Adapter für 135 x 10 mm verfügbar.
Maximale Leistung	2000 Watt
Maximale Steigung	16 %
Abfahrtssimulation	Keine
Maximales Drehmoment	41 Nm
Maximale Bremskraft	120 N
Schwungrad	7,6 kg
Massenträgheit	31,2 kg
Kalibrierung	Spin Down
Standfläche	670 x 642 mm
Höhe	460 mm
Größe zusammengeklappt	
Gewicht	23,6 kg
Drahtlose Kommunikation	ANT+-Konnektivität, drahtlose Bluetooth-Technologie
Bedienung	Smartphone, Tablet, ANT+-Fahrradcomputer, autonom, Computerverbindung über ANT+-Antenne
Ausgabe	Geschwindigkeit, Trittfrequenz, Leistung
Auslesegeräte	Fahrradcomputer, Computer mit ANT+-Antenne, Smartphone, Sportuhr, Tablet
Genauigkeit	< 2,5 %

**KickR Headwind**

# KICKR HEADWIND SPECS

**TECHNISCHE DATEN**

- Teilenummer: WFBKTR7
- Technische Spezifikationen: 120v 60hz
- Abmessungen (bei angezogenem Bein): 16" L x 12" B x 19" H
- Abmessungen (bei ausgestrecktem Bein): 18" L x 12" B x 19" H
- Gewicht: 12 lb / 5.5 kg
- Maximale Ventilatorgeschwindigkeit: 48 km/h /30 mph
- Drahtlose Software-Updates: Ja
- Konnektivität:
  - Bluetooth - Verbindung mit dem Telefon, um die Ventilatorgeschwindigkeit über die App zu steuern
  - ANT+ - Verbindung mit dem Geschwindigkeitssensor, dem Herzfrequenzmesser oder dem Smart Trainer, um die Ventilatorgeschwindigkeit zu steuern
- Anpassbar: Ja - 2 Positionen

## Sensor S-BB-RT

NCTE-Drehmomentsensorik für  
Elektrofahrräder/Pedelecs  
S-BB-RT

PREMIUM QUALITY  
MADE IN GERMANY



### Technische Daten SBBRT - Digital

- Nenn Drehmoment 200Nm, bidirektional
- Gebrauchstemperatur: -20°C bis +70°C
- Schutzart nach EN 60653: IP64
- Ausgangssignal Drehmoment: 0-5 V
- Integrierte Winkelsensoren zur Ermittlung der Drehzahl und Drehrichtung
- Geeignet für Rahmen mit BSA 68

### Besondere Vorteile

- Konform zu DIN EN 15194:2017
- Salzsprühnebeltest 96 Stunden nach DIN EN 60068-2-52:2018 bestanden
- Leichte und intuitive Montage
- Völlig berührungsloses Messsystem
- Made in Germany
- Kein Nachkalibrieren erforderlich

### Kurzbeschreibung

Das als S-BB-RT bezeichnete sensorisches Innenlager mit integrierter Sensorik ist die langjährige erfolgreiche Lösung für die Erfassung von Drehmoment und Drehzahl und Drehrichtung.

Das völlig berührungslose Messprinzip auf Magnetostriktion sowie die robuste Bauart eignen sich optimal für den anspruchsvollen Einsatz in E-Bikes. Unsere langjährige Erfahrung zeigt, dass unsere Sensoren die robusten Anforderungen meistern. Ebenfalls im Labor haben unsere Sensoren ihre Leistungsfähigkeit und Robustheit unter Beweis gestellt und erfüllen die Anforderungen der DIN EN 15194.

Unsere Drehmomentsensoren sorgen dafür, dass Ihr E-Bike so fährt wie Ihre Kunden es erwarten Spritzig, harmonisch und Akku schonend.

Gerne liefern wir unser SBBRT für Ihre Klein-, Mittel- und Großserien.

NCTE-Drehmomentsensorik für  
Elektrofahrräder/Pedelecs  
S-BB-RT



## Technische Kenndaten - SBBRT

	S-BB-RT /Vierkant
Kugellager	2 x 61902-16- 2RS
Wellenoberfläche	Zink A2B
Zertifizierung nach DIN ISO 15194:2017 <sup>1</sup>	Ja
Hülse	Makromelt
Gewinde	BS 1,375x24
Dichtigkeit	IP 64 <sup>2</sup>
Salzwassersprühnebeltest nach DIN EN 60068-2-252:2018	Prüfdauer 96 Stunden bestanden <sup>3</sup>
Impulsgeber	Polring 32 Impulse/Umdrehung
Spannungsversorgung	Digital: +7 ... 16V DC
Strombegrenzte Versorgungsspannung	Max. 1A
Signalausgang Bandbreite:	Drehmoment 250Hz Winkelsensor 4kHz
Messbereich: Drehmoment	±200 Nm
Signalqualität: Drehmoment	±2,5 % FS bezogen auf Linearität
Fehlersignal Drehmomentausgang <sup>4</sup>	Dauerhaft ca. 2,5V
Kennwert der Signalausgabe	10mV/Nm (+/- 2,5%FS)



Setzen Sie bei der Montage keine starken Magneten sowie magnetisierte Werkzeuge ein, da es sonst zu einer Veränderung des Magnetfelds der Welle kommen kann. Das Innenlager wird dadurch dauerhaft funktionslos! Die Tretlager dürfen nur von NCTE Mitarbeitern zerlegt werden, da sonst die Gewährleistung erlischt.

<sup>1</sup> Die Konfiguration des Prüfaufbaus zur Produktfreigabe kann auf Anfrage von NCTE bezogen werden.

<sup>2</sup> Im verbauten Zustand

<sup>3</sup> Im verbauten Zustand

<sup>4</sup> Bei konstanter Signalausgabe im Betrieb

NCTE-Drehmomentsensoren für  
Elektrofahrräder/Pedelecs  
S-BB-RT



## Abmessungen

Nr.	Entspricht folgenden Innenlagerlängen	L2 ±0,5 mm	Lges ±1,0 mm
<b>Innenlager mit Schraubadapter BS 1,375x 24</b>			
1	120 K	24,40	120,00
2	120 L	26,40	120,00
3	128 K	28,40	128,00
4	128 L	30,40	128,00



## Anschlussplan

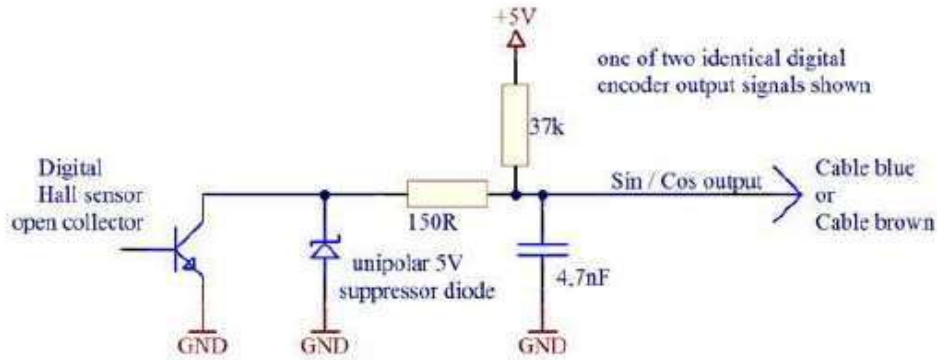


S-BB-RT digital				
Kabelfarbe	PIN	Beschreibung	Signal	Anmerkung
Weiß	1/2	Versorgungsspannung	+7 ... 16V DC	-
Schwarz	2/2	GND	0V	-
Blau	1/3	Channel A	0V / Open collector	16 CPR
Braun	2/3	Channel B	0V / Open collector	16 CPR
Grau	3/3	Drehmoment	Offset 2,5V bei 0Nm	10 mV/Nm

NCTE-Drehmomentsensorik für  
Elektrofahrräder/Pedelecs  
S-BB-RT

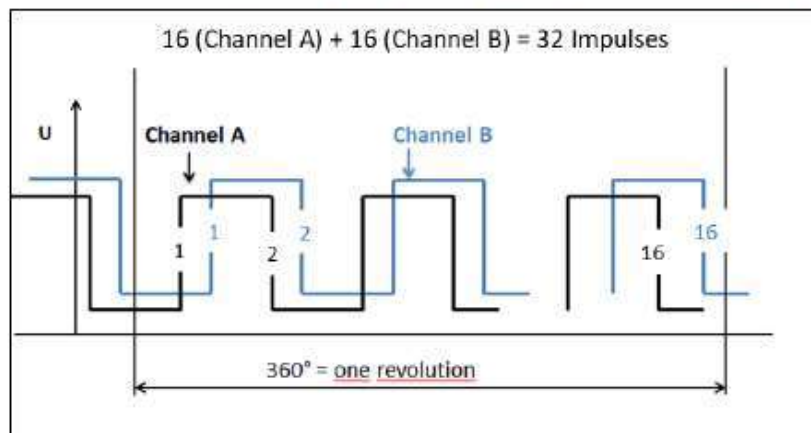


## Anschlusschema



## Winkelsensor

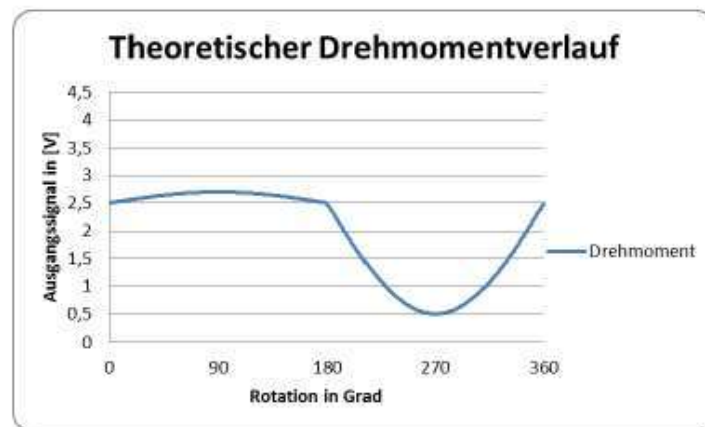
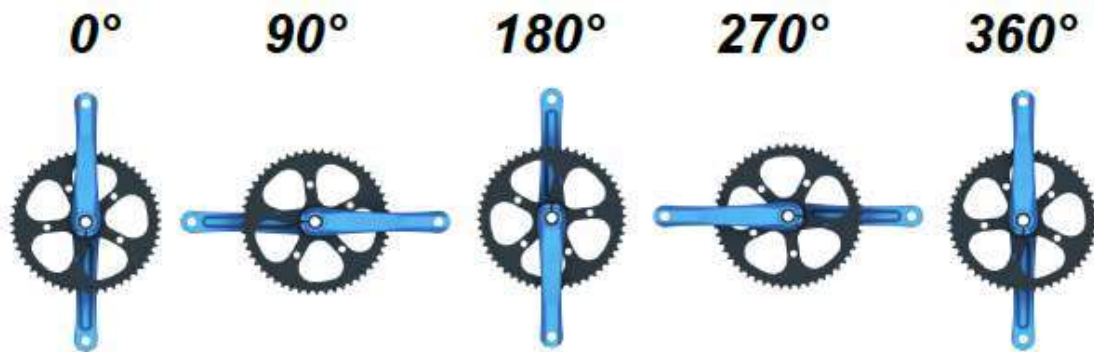
Winkelsensor mit 32 Impulse für eine präzise Ermittlung von Drehzahl und Drehrichtung.



NCTE-Drehmomentsensoren für  
Elektrofahrräder/Pedelecs  
S-BB-RT



## Drehmomentverlauf



NCTE-Drehmomentsensoren für  
Elektrofahrräder/Pedelecs  
S-BB-RT



## Ausführung

Variante	Artikelnummer	Preis
SBBRT-120K	100000450	
SBBRT-120L	100000449	
SBBRT-128K	100000452	
SBBRT-128L	100000451	

Alle Varianten werden mit digitalem Winkelsensor, 100mm Anschlusskabel und Stecker JST PAP 2 und 3 polig geliefert.

## Bedienungsanleitung

Eingesetzt werden die sensorischen Innenlager in allen Arten von E-Bikes vom Cityrad über Trekking- und Mountainbikes bis hin zu Lastenrädern. Sie liefern für ein harmonisches Fahrgefühl die nötigen Signale an die Steuerung und ermöglichen so ein individuelles Fahrgefühl mit akkuschonender Motorunterstützung. Sogenannte S-Pedelecs werden ebenfalls mit unseren Sensoren ausgestattet.

### Allgemeines

Bitte lesen Sie diese Bedienungsanleitung vor dem ersten Gebrauch sorgfältig durch und verwenden Sie das Produkt nur dementsprechend. Bewahren Sie diese Gebrauchsanleitung zum späteren Nachschlagen auf um etwaigen Fehlgebrauch zu vermeiden. Für den korrekten Einbau gehen Sie bitte analog der Montageanleitung vor. Die Gebrauchs- und Montageanleitung kann als PDF-Datei unter folgendem Link heruntergeladen werden: [http://www.ncte.de/serienprodukte\\_downloadbereich/](http://www.ncte.de/serienprodukte_downloadbereich/), oder bei unserem Kundenservice unter: [sales@ncte.de](mailto:sales@ncte.de) angefordert werden.

Erklärung und Bedienungsanleitung bezieht sich nur auf den Sensor in dem Zustand, in dem er in Verkehr gebracht wurde. Vom Endnutzer nachträglich angebrachte Teile und/oder nachträglich vorgenommene Eingriffe bleiben unberücksichtigt.

### Hersteller

Der Hersteller des Drehmomentsensors Serie S-BB-RT- digital ist:  
NCTE AG  
Raiffeisenallee 3  
82041 Oberhaching  
Deutschland  
Tel.: + 49 (0) 89 665 619-0

### Bestimmungsgemäße Verwendung und Einbaubereich

Der Sensor ist für den Einsatz in Fahrrädern mit Elektroantrieb (Pedelec, E-Bike und Elektrofahrrad) im Sinne des § 39 Abs. 7 der deutschen Straßenverkehrs-Ordnung vorgesehen. Verwenden Sie das Produkt nur in Fahrradrahmen mit einem BSA Gewinde und 68mm Lagerbreite. An den Vierkantwellenenden sind Kurbelarme zu montieren. Der Sensor misst das über Pedal und Kurbelwelle eingebrachte Drehmoment im Uhrzeigersinn. Der Sensor erfasst auch Drehzahl und Drehrichtung. Aus Sicherheitsgründen darf die Motorunterstützung nur aktiviert werden, wenn beide Drehzahlausgänge mehrere korrekte und plausible Signalfolgen liefern.

Dazu ist aus beiden Signalen die Drehrichtung und die Drehzahl zu ermitteln und auf sinnvolle Grenzwerte zu prüfen.

NCTE-Drehmomentsensorik für  
Elektrofahrräder/Pedelecs  
S-BB-RT



Jede andere Verwendung gilt als nicht bestimmungsgemäß und kann zu Sachschäden oder sogar Personenschäden führen. Der Hersteller übernimmt keine Haftung für Schäden, die durch nicht bestimmungsgemäße oder falschen Gebrauch entstehen.

### Mögliche Fehlerfälle

Bei einem unerwarteten Defekt der Elektronik gibt diese einen konstanten Wert von ca. 2,5V aus, der 0 Nm entspricht.

Bei einem Blockieren des Sensors kontaktieren Sie bitte umgehend den Hersteller und verwenden Sie das Produkt nicht weiter.

### Lieferumfang

Das Drehmomentsensor-System besteht aus einem kalibrierten Sensor, mit im Gehäuse integrierter Signalaufnahme/-verarbeitung, und einem der Konfiguration entsprechendem Anschlusskabel.

### Handhabung und Transport

Bei Handhabung, Lagerung und Transport ist darauf zu achten, dass der Sensor keinen starken magnetischen oder elektromagnetischen Feldern (z. B. Entmagnetisierungsspulen) ausgesetzt wird. Auch ist darauf zu achten, dass kein magnetisches Werkzeug verwendet wird.

### Montage

Für den korrekten Einbau gehen Sie bitte analog der Montageanleitung vor. Die Gebrauchs- und Montageanleitung kann als PDF-Datei unter folgendem Link heruntergeladen werden: [http://www.ncte.de/serienprodukte\\_downloadbereich/](http://www.ncte.de/serienprodukte_downloadbereich/), oder bei unserem Kundenservice unter: [sales@ncte.de](mailto:sales@ncte.de) angefordert werden.

Bitte beachten Sie die Pin Belegung im Stecker

### Wichtige technische Sicherheitshinweise

1. Ein Öffnen des Sensors ist grundsätzlich nicht gestattet.
2. Stöße und Stürze sind im unverbauten Zustand zu vermeiden.
3. Zur Vorbeugung gegen Schäden durch Kurzschluss an der Anschlussleitung ist die Stromzufuhr des Sensors ist durch eine geeignete Vorsicherung (ca. 1A Nennstrom) zu begrenzen.
4. Der Sensor darf nur innerhalb der zugelassenen Belastungsgrenzen betrieben werden. Diese finden Sie entsprechend in der Norm DIN 15194:2017 und ISO 4210:2018 Cycles- Safety requirements for bicycles Part 2:Requirements for city bicycles Chapter 4.13: Pedals and pedal/crank drive system
5. Die Verpolung oder Überspannung an der Anschlussleitungen kann zur Beschädigung des Sensors führen, die Adernleitungen sind entsprechend dem Anschlussschema an der Klemmleiste aufzulegen.
6. Die Leitungsführung außerhalb des Fahrradrahmens kann zur Beeinträchtigung der Störempfindlichkeit am Sensor führen. NCTE empfiehlt die Verlegung der Anschluss und Datenleitung entsprechend im Rahmen, sollte aus technischen Gründen diese Verlegung nicht möglich sein ist die Einstrahlungsempfindlichkeit vom EPAC Hersteller entsprechend neu zu bewerten.

### Entsorgung

Entsorgen Sie den Artikel und alle zugehörigen Komponenten über einen zugelassenen Entsorgungsbetrieb. Beachten Sie die aktuell geltenden Vorschriften. Erkundigen Sie sich im Zweifelsfall bei Ihrer Entsorgungseinrichtung über eine umweltgerechte Entsorgung.

### Service

Service-Kontakt: Tel.: +49 89 66 56 19 0 oder E-Mail: [sales@ncte.de](mailto:sales@ncte.de)

NCTE-Drehmomentsensorik für  
Elektrofahrräder/Pedelecs  
S-BB-RT



## Reinigung

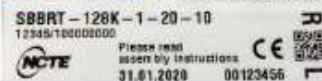
Der Sensor darf nicht mit einem Hochdruckreiniger gereinigt werden, da die Kugellager beschädigt werden könnten.

Der Kontakt oder die Reinigung des Sensors mit Lösungsmittelhaltigen Flüssigkeiten ist nicht gestattet

## Konformität zu den Richtlinien der EG

Das Produkt erfüllt die Anforderungen der Europäischen Union zu CE. Für weitere Auskünfte hierzu wenden Sie sich bitte an den Kundensupport ([sales@ncte.de](mailto:sales@ncte.de)). Dass die Konformität gegeben ist erkennen Sie am

Sensor Label mit dem CE Kennzeichen.



## VS-Sensorik RGM2G-D



# Magnetischer Zahnradgeber RGM2G-D mit interpolierten TTL-Ausgangssignalen



### Berührungslos arbeitender Inkrementalgeber zur Messung von Drehbewegungen

- Hochauflösende Messung von Drehzahl und Drehwinkel bis 60.000 1/min
- Drehrichtungserkennung
- Robust, unempfindlich gegenüber Schmutz
- Temperaturstabil bis 110°C
- Hohe EMV- & ESD- Stabilität
- Kundenspezifische Ausführungen durch flexibles Konstruktionsprinzip
- Interpolationsfaktor ab Werk wählbar
- I2C-Schnittstelle zur Einstellung der Signalparameter bei Bedarf
  
- Verwendung in Antriebsspindeln von Werkzeugmaschinen
- Einbau in Antriebsmotoren

### Ausgangssignale

- 90° phasenversetzte TTL-Rechtecksignale/RS422
- Referenzimpuls
- Remote Sense RS\_UB
- Versorgungsspannung UB = 5V
- Verpolungsschutz
- Kurzschlussfest

### Messprinzip

- Magnetisches, berührungsloses Abtasten von Zahnradern aus Stahl mit einem Modul  $M = 0,3$  oder  $0,5$
- Nutzung magneto-resistiver (GMR-) Sensorelemente
- Hohe Messgenauigkeit bei Verwendung von Messzahnradern z.B. vom Typ ZR3-256/Di oder ZR5-256/Di
- Interne Interpolationselektronik

### Aufbau

- Robustes Sensorgehäuse aus Metall
- GMR-Sensorelemente
- Frontseitige Abdeckung der Sensorelemente mit Metallfolie als zusätzlicher Schutz vor ESD-Impulsen
- Elektronik zur Signalkonditionierung
- Vollständiger Verguss des Geberinnenraumes
- Geschirmtes Anschlusskabel mit AWG28
- Anschlussstecker optional

## RGM2G-D-...3

... für Zahnräder mit Modul  $M = 0,3$

## RGM2G-D-...5

... für Zahnräder mit Modul  $M = 0,5$

Datent: VS-Sensorik\_DS\_D\_RGM2G\_Verl002 2 Blatt 1 Datum: 01.11.2011

VS Sensorik GmbH, Edisonstr. 19, D-33689 Bielefeld, Tel: 05205 / 99 88 69 0, Fax: 05205 / 99 88 69 99, [www.vs-sensorik.com](http://www.vs-sensorik.com)

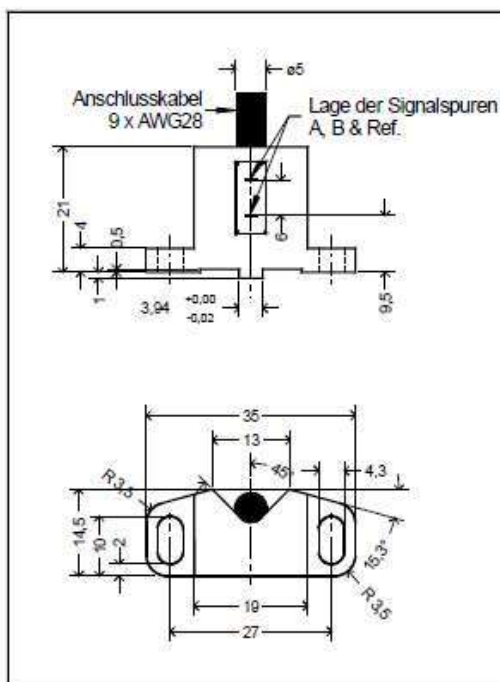
## Magnetischer Zahnradgeber RGM2G-D Technische Daten

### Signalparameter

Jeder Geber wird vor der Auslieferung beim Nennabstand Geber - Zahnrad  $d_0 = 0,1\text{mm}$  (für  $M = 0,3$ ) bzw.  $0,3\text{mm}$  (für  $M = 0,5$ ) auf optimale Signalwerte abgeglichen.

Bedingt durch spätere Anbautoleranzen, Zahnradqualität sowie Temperatur- und Drehzahleinflüsse können sich Abweichungen der Signalparameter von den optimalen Werten ergeben.

■ Signaltyp	digital, Differenzsignale Spur A, Spur B Ref.-Impuls invertierte Signale A, B & Ref
■ Signalpegel	TTL / RS422
■ Ausgangsfrequenz f	0 ... 200kHz
■ Interpolationsfaktor IF	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 16, 20, 24, 25 oder 32 (höhere IF-Faktoren auf Anfrage)



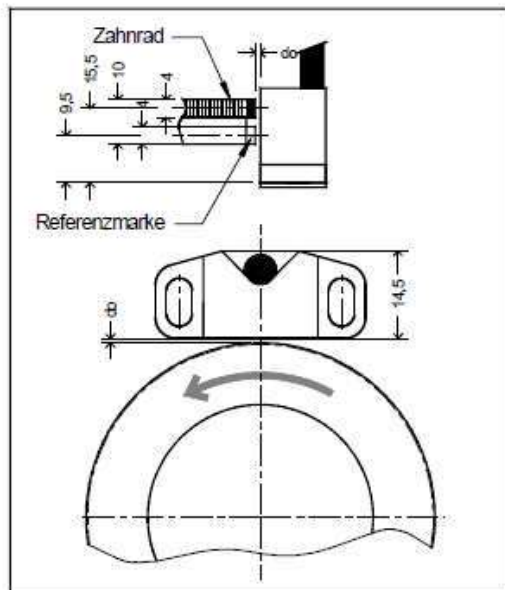
### Allgemeine Parameter

■ Versorgungsspannung UB	5VDC +/- 5%
■ Stromverbrauch ohne Last	50mA
■ Arbeitstemperatur	-20 ... 85°C (bis 100°C auf Anfrage)
■ Lagertemperatur	-30 ... 110°C
■ Optimaler Abstand $d_0$ Geber-Zahnrad	0,1 +/- 0,02mm für $M = 0,3$ 0,3 +/- 0,02mm für $M = 0,5$
■ Vibrationsfestigkeit	bis 200 $\text{m/s}^2$
■ Schockfestigkeit	bis 2000 $\text{m/s}^2$
■ Schutzart	IP68

Dat: VS-Sensorik\_D8\_D\_RGM2G\_Version 2 Blatt 2 Datum: 01.11.2011

VS Sensorik GmbH, Edisonstr. 19, D-33689 Bielefeld, Tel: 05205 / 99 88 69 0, Fax: 05205 / 99 88 69 99, [www.vs-sensorik.com](http://www.vs-sensorik.com)

## Magnetischer Zahnradgeber RGM2G-D Montage & Elektrischer Anschluss



Der Pfeil zeigt die Bewegungsrichtung bei Links-drehung des Zahnrades mit Blick auf den Geber an.

### Montage

Bei der Montage der Geber ist wie folgt vorzugehen:

1. Abstandslehre der entsprechenden Dicke  $d_o$  auf die Vorderseite des Gebers legen.
2. Den Geber mittels 2 Schrauben M4 fixieren - dabei die Schrauben noch nicht fest anziehen. Der Geber sollte beweglich bleiben.
3. Den Geber leicht gegen das Zahnrad drücken. Die Schrauben wechselseitig festdrehen.
4. Nach dem Festschrauben des Gebers Abstandslehre (Abstandsfolie) nach oben entfernen.

### Abstand Geber - Zahnrad $d$ (Luftspalt)

Der optimale Abstand Geber - Zahnrad  $d_o$  beträgt:

- $0,1 \pm 0,02\text{mm}$  für Modul  $M = 0,3$
- $0,3 \pm 0,02\text{mm}$  für Modul  $M = 0,5$

Bei diesem Abstand  $d_o$  werden die Geber auf optimale Signalparameter abgeglichen. Im Bedarfsfall können die Signalwerte über die I2C-Schnittstelle korrigiert werden.

### Kabelbelegung

Am Ausgang des Gebers ist ein geschirmtes Kabel mit 9 Adern AWG28. Die Belegung des Kabels ist wie folgt:

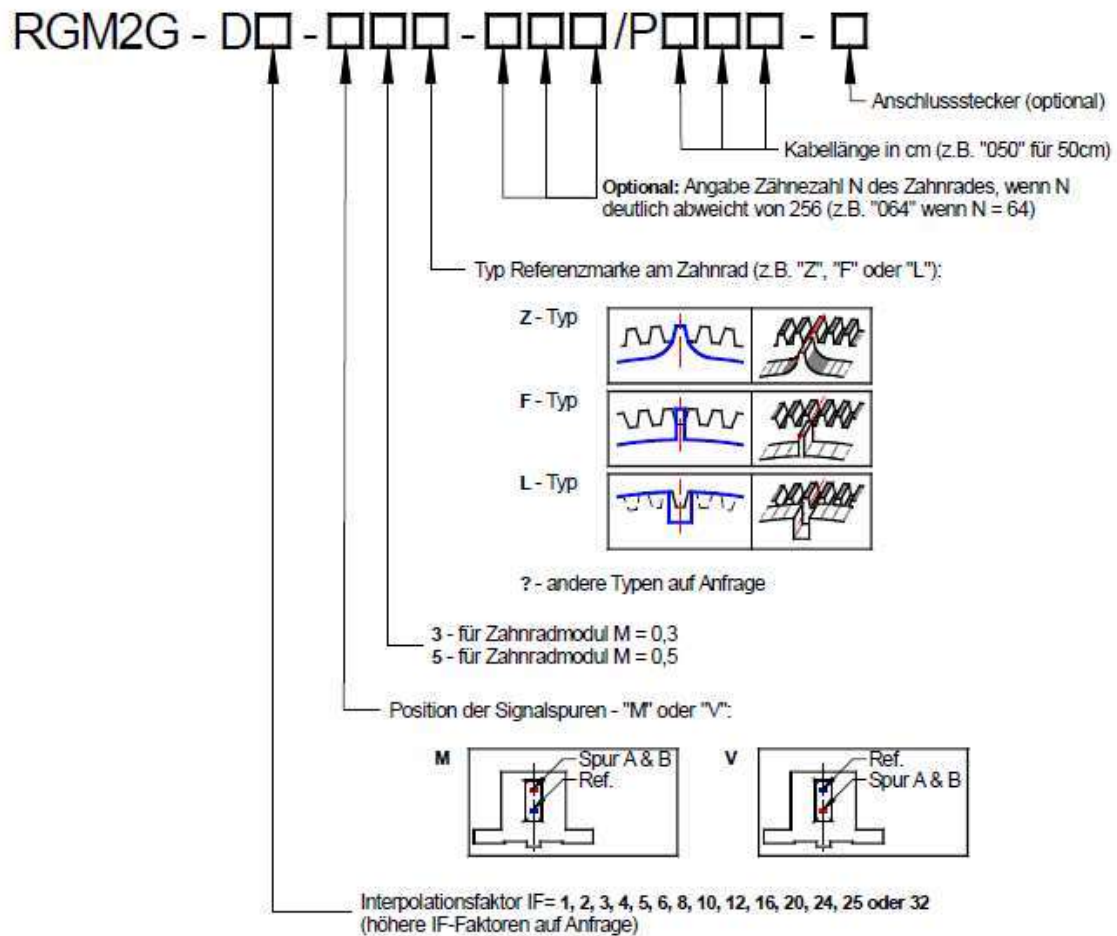
■ Signal A +	Braun
■ Signal A -	Grün
■ Signal B +	Grau
■ Signal B -	Orange
■ Signal Ref +	Rot
■ Signal Ref -	Schwarz
■ UB = 5VDC	Violett
■ GND (0V)	Gelb
■ RS_5V	Blau

Der Schirm ist auf Geberseite mit dem Gehäuse verbunden.

Daten VS-Sensorik\_DB\_D\_RGM2D Version 2 Blatt 3 Datum 01.11.2011



## Magnetischer Zahnradgeber RGM2G-D Bestellbezeichnungen & Zubehör



### Zubehör

Messzahnräder: ZR3-256/Di oder ZR5-256/Di  
Andere Zahnradtypen auf Anfrage.

Datei: VS-Sensorik\_08\_D\_RGM2G\_Version 2 Blatt 4 Datum: 01.11.2011

VS Sensorik GmbH, Edisonstr. 19, D-33689 Bielefeld, Tel: 05205 / 99 88 69 0, Fax: 05205 / 99 88 69 99, [www.vs-sensorik.com](http://www.vs-sensorik.com)

## Inkrementaler Drehgeber KIH40



### Inkrementale Drehgeber

**Kompakt  
optisch**

Sendix Base KIS40 / KIH40 (Welle / Hohlwelle)

Gegentakt / RS422 / Open collector



Die auf höchste Wirtschaftlichkeit ausgelegten inkrementalen Drehgeber Sendix Base KIS40 / KIH40 mit optischer Sensorik sind bis zu einer Auflösung von 2500 Impulsen pro Umdrehung lieferbar.

Sie sind besonders für engen Einbauraum sowie kleinere Maschinen und Geräte geeignet.



#### Kompakt und robust

- Nur 40 mm Außendurchmesser.
- Ideal geeignet für begrenzten Einbauraum.
- Robuster Lageraufbau im Safety Lock™ Design.
- Sichere Inbetriebnahme: Verpolschutz und kurzschlussfest.

#### Flexibel

- Maximale Auflösung 2500 Impulse pro Umdrehung.
- Versorgungsspannung 5 V DC, 10 ... 30 V DC oder 5 ... 30 V DC.
- Gegentakt, RS422 oder Open collector.
- Kabel radial oder axial.

**Bestellschlüssel** 8.KIS40 . 1 XXX . XXXX . PXX " **Welle** Typ

**1** Flansch  
1 = Klemm- / Synchroflansch, ø 40 mm

**3** Welle (ø x L)  
3 = ø 6 x 12,5 mm, mit Fläche  
5 = ø 1/4" x 12,5 mm, mit Fläche  
6 = ø 8 x 12,5 mm, mit Fläche

**3** Ausgangsschaltung / Versorgungsspannung  
3 = Open collector NPN (mit Invertierung) / 10 ... 30 V DC  
4 = Gegentakt (mit Invertierung) / 10 ... 30 V DC  
6 = RS422 (mit Invertierung) / 5 V DC  
7 = Open collector NPN (ohne Invertierung) / 10 ... 30 V DC  
8 = Gegentakt (ohne Invertierung) / 10 ... 30 V DC  
A = Open collector NPN (mit Invertierung) / 5 ... 30 V DC  
B = Gegentakt (mit Invertierung) / 5 ... 30 V DC  
C = RS422 (mit Invertierung) / 5 ... 30 V DC

**1** Anschlussart  
1 = Kabel axial, 2 m PVC  
2 = Kabel radial, 2 m PVC  
A = Kabel axial, Sonderlänge PVC \*)  
B = Kabel radial, Sonderlänge PVC \*)  
\*) Verfügbare Sonderlänge (Anschlussart A, B):  
3 m, 5 m, 8 m, 10 m, 15 m  
Erweiterung Bestellschlüssel .XXXX = Länge in dm  
Bsp.: 8.KIS40.134A.1024.0050 (bei 5 m Kabellänge)

**1** Impulszahl  
25, 50, 60, 100, 200, 360, 500, 512,  
600, 1000, 1024, 2000, 2048, 2500  
(z.B. 500 Impulse => 0500)

**1** Sonderformat Ausgangssignal  
P03 = siehe Seite 3

**Lagertypen**  
8.KIS40.1342.0360  
8.KIS40.1342.0500  
8.KIS40.1342.1000  
8.KIS40.1342.1024  
8.KIS40.1342.2048  
8.KIS40.1342.2500  
8.KIS40.1362.0500  
8.KIS40.1362.1024  
8.KIS40.1362.2048

**Optional auf Anfrage**  
- Andere Impulszahlen

1) Wird nur benötigt, wenn ein Sonderformat des Ausgangssignals gewünscht ist.



## Inkrementale Drehgeber

<b>Kompakt optisch</b>	<b>Sendix Base KIS40 / KIH40 (Welle / Hohlwelle)</b>	<b>Gegentakt / RS422 / Open collector</b>								
<b>Bestellschlüssel</b>	<b>8.KIH40 . XXXX . XXXX . PXX <sup>1)</sup></b>									
<b>Hohlwelle</b>	<table border="1"> <tr> <td>Typ</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </table>		Typ	0	1	2		0	0	0
Typ	0	1	2							
	0	0	0							
<p><b>a</b> Flansch 2 = mit Federelement, lang 5 = mit Statorkupplung, ø 46 mm</p> <p><b>b</b> Sackloch-Hohlwelle (Einstecktiefe max. 18 mm) 2 = ø 6 mm 4 = ø 8 mm 3 = ø 1/4"</p> <p><b>c</b> Ausgangsschaltung / Versorgungsspannung 3 = Open collector NPN (mit Invertierung) / 10 ... 30 V DC 4 = Gegentakt (mit Invertierung) / 10 ... 30 V DC 6 = RS422 (mit Invertierung) / 5 V DC 7 = Open collector NPN (ohne Invertierung) / 10 ... 30 V DC 8 = Gegentakt (ohne Invertierung) / 10 ... 30 V DC A = Open collector NPN (mit Invertierung) / 5 ... 30 V DC B = Gegentakt (mit Invertierung) / 5 ... 30 V DC C = RS422 (mit Invertierung) / 5 ... 30 V DC</p>	<p><b>d</b> Anschlussart 1 = Kabel axial, 2 m PVC 2 = Kabel radial, 2 m PVC A = Kabel axial, Sonderlänge PVC *) B = Kabel radial, Sonderlänge PVC *) *) Verfügbare Sonderlänge (Anschlussart A, B): 3 m, 5 m, 8 m, 10 m, 15 m Erweiterung Bestellschlüssel .XXXX = Länge in dm Bsp.: 8.KIH40.544A.1024.0050 (bei 5 m Kabellänge)</p> <p><b>e</b> Impulszahl 25, 50, 60, 100, 200, 360, 500, 512, 600, 1000, 1024, 2000, 2048, 2500 (z.B. 500 Impulse -&gt; 0500)</p> <p><b>f</b> Sonderformat Ausgangssignal P03 = siehe Seite 3</p>	<p><b>Lagertypen</b> 8.KIH40.2442.1024 8.KIH40.2462.1000 8.KIH40.2462.1024 8.KIH40.5442.0360 8.KIH40.5442.0500 8.KIH40.5442.1024 8.KIH40.5442.2048 8.KIH40.5442.2500 8.KIH40.5462.0500 8.KIH40.5462.2048</p> <p><b>Optional auf Anfrage</b> - Andere Impulszahlen</p>								
<b>Montagezubehör für Wellen-Drehgeber</b>		<b>Bestell-Nr.</b>								
<b>Kupplung</b>	Balgkupplung ø 15 mm für Welle 6 mm	<b>8.0000.1202.0606</b>								

Weiteres Kübler Zubehör finden Sie unter: [kuebler.com/zubehoer](http://kuebler.com/zubehoer)

Technische Daten	
<b>Mechanische Kennwerte</b>	
<b>Maximale Drehzahl</b>	4500 min <sup>-1</sup>
<b>Massenträgheitsmoment</b>	ca. 0,2 x 10 <sup>-4</sup> kgm <sup>2</sup>
<b>Anlaufdrehmoment (bei 20 °C)</b>	< 0,05 Nm
<b>Wellenbelastbarkeit</b>	radial 40 N axial 20 N
<b>Gewicht</b>	ca. 0,17 kg
<b>Schutzart nach EN 60529</b>	IP64
<b>Arbeitsbereich</b>	
<b>Arbeitstemperaturbereich</b>	-20 °C ... +70 °C
<b>Werkstoffe</b>	Welle nicht rostender Stahl Flansch Aluminium Gehäuse Aluminium Kabel PVC
<b>Schockfestigkeit nach EN 60068-2-27</b>	1000 m/s <sup>2</sup> , 6 ms
<b>Vibrationsfestigkeit nach EN 60068-2-6</b>	100 m/s <sup>2</sup> , 55 ... 2000 Hz

1) Wird nur benötigt, wenn ein Sonderformat des Ausgangssignals gewünscht ist.



## Inkrementale Drehgeber

<b>Kompakt optisch</b>	<b>Sendix Base KIS40 / KIH40 (Welle / Hohlwelle)</b>	<b>Gegentakt / RS422 / Open collector</b>
------------------------	--	---

Elektrische Kennwerte			
<b>Ausgangsschaltung</b>	RS422 (TTL-kompatibel)	Gegentakt <sup>1)</sup> (7272-kompatibel)	Open Collector NPN (7273)
<b>Versorgungsspannung</b>	5 V DC ( $\pm 5\%$ ) / 5 ... 30 V DC	10 ... 30 V DC / 5 ... 30 V DC	10 ... 30 V DC / 5 ... 30 V DC
<b>Stromaufnahme mit Invertierung (ohne Last)</b>	typ. 40 mA max. 90 mA / max. 165 mA	typ. 50 mA max. 100 mA	100 mA
<b>Zulässige Last / Kanal</b>	max. +/- 20 mA	max. +/- 20 mA	20 mA sink bei 30 V DC
<b>Impulsfrequenz</b>	max. 250 kHz	max. 250 kHz	max. 250 kHz
<b>Signalpegel</b>	HIGH min. 2,5 V LOW max. 0,5 V	min. +V - 2,0 V max. 0,5 V	
<b>Flankenanstiegszeit <math>t_r</math></b>	max. 200 ns	max. 1 $\mu$ s	
<b>Flankenabfallzeit <math>t_f</math></b>	max. 200 ns	max. 1 $\mu$ s	
<b>Kurzschlussfeste Ausgänge <sup>2)</sup></b>	ja <sup>3)</sup>	ja	ja
<b>Verpolschutz der Versorgungsspannung</b>	nein / ja	ja	ja
<b>UL-Zulassung</b>	File-Nr. E224618		
<b>CE-konform gemäß</b>	EMV-Richtlinie 2014/30/EU – RoHS-Richtlinie 2011/65/EU		

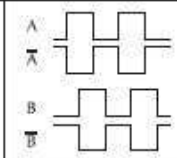
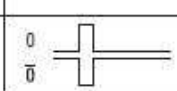
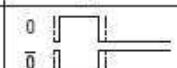
### Anschlussbelegung

Ausgangsschaltung	Anschlussart	Kabel (nicht verwendete Adern sind vor Inbetriebnahme einzeln zu isolieren)									
3, 4, 6, A, B, C mit Invertierung	1, 2, A, B	Signal:	0 V	+V	A	$\bar{A}$	B	$\bar{B}$	0	$\bar{0}$	
		Aderfarbe:	WH	BN	GN	YE	GY	PK	BU	RD	
7, 8 ohne Invertierung	1, 2, A, B	Signal:	0 V	+V	A	–	B	–	0	–	
		Aderfarbe:	WH	BN	GN	–	GY	–	BU	–	

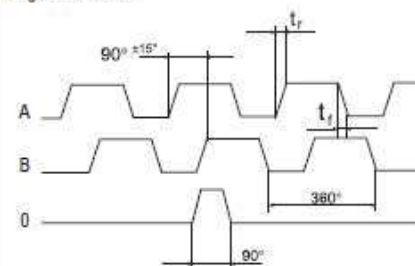
- +V: Versorgungsspannung Drehgeber +V DC
- 0 V: Masse Drehgeber GND (0 V)
- A,  $\bar{A}$ : Inkremental-Ausgang Kanal A
- B,  $\bar{B}$ : Inkremental-Ausgang Kanal B
- 0,  $\bar{0}$ : Referenzsignal

### Format Ausgangssignale

Alle Kubler-Drehgeber verfügen als Standard über sechs Kanäle, wobei A im Uhrzeigersinn B voreilt und der Standard-Index mit A & B verknüpft ist. Die Toleranz der Wellenform beeinflusst die Steuerung und kann in bestimmten Fällen die Laufruhe des Systems beeinträchtigen.

<b>A eilt B vor</b>	wenn die Welle vom Wellenende oder vom Klemmring aus gesehen im Uhrzeigersinn dreht. Dies ist der Kubler-Standard. Dieses Format gilt für die unten aufgeführten Bestelloptionen.	
<b>Bestelloption 0</b>		
<b>Standard</b>	0 mit A & B verknüpft. Dies ist der Kubler-Standard. 0 ist 90° weit.	
<b>P03</b>	0 unverknüpft. 0 ist 330° bis 360° weit.	

### Signal-Toleranzen



$t_r$  = Flankenanstiegszeit  
 $t_f$  = Flankenabfallzeit

- 1) Max. empfohlene Kabellänge 30 m.
- 2) Bei korrekt angelegter Versorgungsspannung.
- 3) Nur max. ein Kanal darf kurzgeschlossen sein.  
Bei -V = 5 V DC ist Kurzschluss gegenüber einem anderen Kanal, 0 V, oder +V zulässig.  
Bei +V = 5 ... 30 V DC ist Kurzschluss gegenüber einem anderen Kanal oder 0 V zulässig.



## USB-Geberschnittstelle RLS E201D01\_07

Data sheet  
E201D01\_07  
Issue 7, 28<sup>th</sup> November 2019



### E201 USB Encoder Interface



The E201 is a single channel USB encoder interface suitable for use with a wide variety of 5 V rotary and linear encoders.

It allows encoders to be easily interfaced and powered from a PC using only a USB cable. The E201 is available in 3 versions:

- E201-9B supporting absolute BiSS-C mode (bidirectional) encoders
- E201-9Q supporting incremental encoders
- E201-9S supporting absolute SSI and BiSS-C mode (unidirectional) encoders

All versions are pin compatible with RLS rotary and linear magnetic encoders.

Two status LEDs are included to indicate USB status and encoder activity.

#### Demo software installation

Download and install the demo software from [www.rls.si/E201](http://www.rls.si/E201). During the installation all necessary drivers are installed.

When installation is completed, connect the E201 interface and configure the software for the encoder you will be using.

Encoder supply voltage and current consumption can be read out by the software. Power supply to the encoder can be switched on/off by the software.

For custom development of a software, a detailed explanation of the ASCII commands can be found in this datasheet under the Programming commands section.

#### Applications

- Encoder functional test
- Encoder demonstration
- Metrology
- Gauging
- PC based machinery

A **RENISHAW** associate company

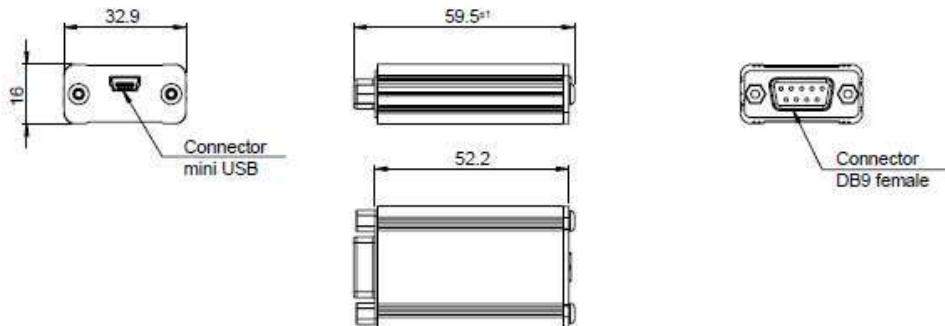
Data sheet  
E201D01\_07

## E201-9B – for BiSS-C mode (bidirectional) encoders

The E201-9B interrogates an BiSS-C encoder and allows the data to be read by a PC using simple ASCII commands over a USB connection.

### Dimensions

Dimensions and tolerance in mm.



### Technical specifications

<b>Power supply</b>	5 V over USB port.
<b>Power consumption</b>	65 mA (without encoder connected)
<b>Encoder power supply</b>	5 V or lower as supplied from the computer. Consider voltage drop over USB cable, USB hubs and encoder cable. Output is fused.
<b>Data outputs</b>	Clock/MA (differential pair – RS422)
<b>Data inputs</b>	Data/SLO (differential pair – RS422)
<b>USB connector</b>	USB 1.1 Full Speed; USB 5 pin mini-B connector
<b>Drivers</b>	Virtual Com Port (VCP) drivers available for 32-bit and 64-bit Windows (XP, Vista, 7 and 8/8.1, 10)* Linux** and Mac OS X uses generic CDC drivers.
<b>Cable length</b>	1 m standard A to mini-B USB cable (supplied). Maximum length 5 m.
<b>Operating temperature</b>	0 °C to +45 °C
<b>Environmental sealing</b>	IP20 – indoor use only
<b>Mass</b>	42 g (interface without USB cable)

\* Windows CE and Embedded do not have all files present in "Windows" folder for correct driver installation. Additional files must be copied from other Desktop system.

\*\* The E201 is Linux compatible because it uses generic CDC driver, however it has not been tested in-house and no support is available.

### Status LEDs

LED colour	USB	Encoder
Red	/	Power off
Yellow	/	Power on
Green	Power on	Communication active

### Connections

Pin	Function
	BiSS encoder
1	0 V
2	MA+
3	MA-
4	NC
5	5 V
6	SLO+
7	SLO-
8	NC
9	0 V

**NOTE:** Connections are directly compatible with the pin-out for RLS encoders. When used with Renishaw encoder, the encoder pin-out might need to be modified.

### Part numbering

**E201-9B** USB interface for use with absolute BiSS-C mode (bidirectional) encoders.

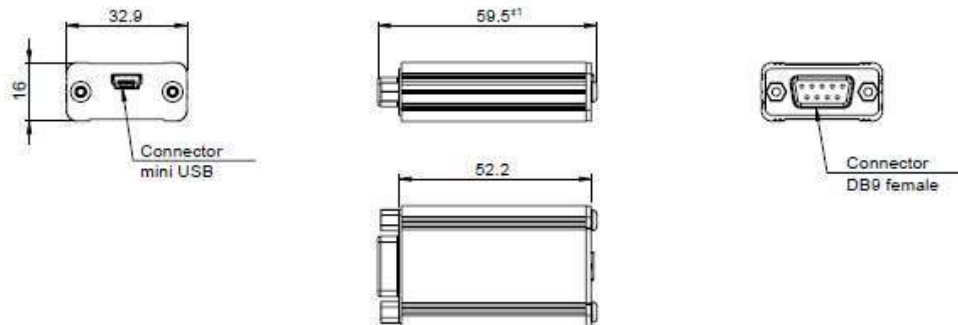


## E201-9Q – for 5 V incremental encoders

The E201-9Q counts edges from 5 V incremental encoders and allows the count value to be read by a PC using simple ASCII commands over a USB connection.

### Dimensions

Dimensions and tolerance in mm.



### Technical specifications

<b>Power supply</b>	5 V over USB port
<b>Power consumption</b>	85 mA (without encoder connected)
<b>Encoder power supply</b>	5 V or lower as supplied from the computer. Consider voltage drop over USB cable, USB hubs and encoder cable. Output is fused.
<b>Inputs</b>	RS422 differential A, B, Z, A-, B-, Z- or single ended A, B, Z with 5 V TTL levels
<b>Maximum count rate</b>	10 MHz, if using reference marks 40 MHz, if not using reference marks *
<b>USB connector</b>	USB 1.1 Full Speed; USB 5 pin mini-B connector
<b>Drivers</b>	Virtual Com Port (VCP) drivers available for 32-bit and 64-bit Windows (XP, Vista, 7 and 8/8.1, 10)** Linux*** and Mac OS X uses generic CDC drivers.
<b>Cable length</b>	1 m standard A to mini-B USB cable (supplied). Maximum length 5 m.
<b>Operating temperature</b>	0 °C to +45 °C
<b>Environmental sealing</b>	IP20 – indoor use only
<b>Mass</b>	42 g (interface without USB cable)

\* Units produced after May 2015 are compatible with high-speed optical encoders.  
\*\* Windows CE and Embedded do not have all files present in "Windows" folder for correct driver installation. Additional files must be copied from other Desktop system.  
\*\*\* The E201 is Linux compatible because it uses generic CDC driver, however it has not been tested in-house and no support is available.

### Status LEDs

LED colour	USB	Encoder
Red	Disconnected	Reference mark found
Yellow	Connected	Encoder not moving
Green	Communication in progress	Encoder moving

### Connections

Pin	Function
1	0V
2	Z+
3	B+
4	A+
5	5V
6	Z-
7	B-
8	A-
9	0V

Encoder input  
(‘D’ type connector – 9 way)

**NOTE:** Connections are directly compatible with the pin-out for RLS encoders. When used with Renishaw encoder, the encoder pin-out might need to be modified.

### Part numbering

E201-9Q USB interface for use with incremental encoders

A **RENISHAW** associate company

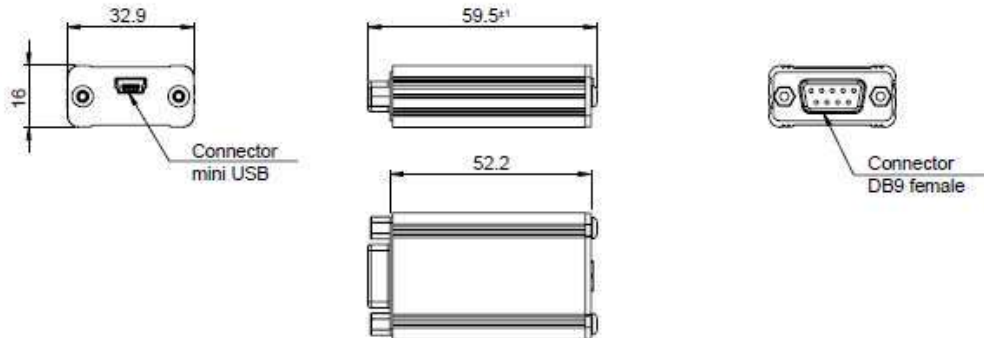
Data sheet  
E201D01\_07

## E201-9S – for 5 V absolute SSI/BiSS-C mode (unidirectional) encoders

The E201-9S interrogates an SSI/BiSS encoder and allows the data to be read by a PC using simple ASCII commands over a USB connection.

### Dimensions

Dimensions and tolerance in mm.



### Technical specifications

<b>Power supply</b>	5 V over USB port
<b>Power consumption</b>	65 mA (without encoder connected)
<b>Encoder power supply</b>	5 V or lower as supplied from the computer. Consider voltage drop over USB cable, USB hubs and encoder cable. Output is fused.
<b>Data outputs</b>	Clock/MA (differential pair – RS422)
<b>Data inputs</b>	Data/SLO (differential pair – RS422)
<b>USB connector</b>	USB 1.1 Full Speed; USB 5 pin mini-B connector
<b>Drivers</b>	Virtual Com Port (VCP) drivers available for 32-bit and 64-bit Windows (XP, Vista, 7 and 8/8.1, 10) Linux* and Mac OS X uses generic CDC drivers.
<b>Cable length</b>	1 m standard A to mini-B USB cable (supplied). Maximum length 5 m.
<b>Operating temperature</b>	0 °C to +45 °C
<b>Environmental sealing</b>	IP20 – indoor use only
<b>Mass</b>	42 g (interface without USB cable)

\* The E201 is Linux compatible because it uses generic CDC driver, however it has not been tested in-house and no support is available.

### Status LEDs

LED colour	USB	Encoder
Red	Disconnected	Encoder not connected
Yellow	Connected	-
Green	Communication in progress	Encoder connected

### Part numbering

E201-9S      USB interface for use with absolute SSI and BiSS-C mode (unidirectional) encoders

### Connections

Pin	Function	
	SSI encoder	BiSS encoder
1	0 V	0 V
2	Clock+	MA+
3	Clock-	MA-
4	NC	NC
5	5 V	5 V
6	Data+	SLO+
7	Data-	SLO-
8	NC	NC
9	0 V	0 V

NOTE: BiSS is hardware compatible to SSI.

NOTE: Connections are directly compatible with the pin-out for RLS encoders. When used with Renishaw encoder, the encoder pin-out might need to be modified.



## Programming commands

**NOTE:** Note this section is only needed if you wish to develop your own software. The E201 is provided with simple display software.

This section contains detailed information on the communication between the E201 interface and PC which is needed to develop a customised software.

### Installation of USB Drivers

Download the E201 software which includes the USB drivers from [www.rls.si/E201](http://www.rls.si/E201) and follow the installation steps. The drivers will be installed during the software installation. The E201 interface will appear as a new Virtual COM port on the computer. The actual port number assigned depends on how many COM ports are already in use on the PC.

In Windows 7 this can be found under:

Control Panel > System > Device Manager > Ports (COM & LPT)

Supported operating systems: 32-bit and 64-bit Windows (XP, Vista, 7 and 8/8.1, 10) Linux and Mac OS X.

The E201 USB interface should be automatically recognized on the Linux and Mac OS X system:

It uses the »Communication Device Class driver (CDC)«.

VID = 0483 & PID = 5740

### Communications

The E201 interface responds to ASCII commands received over the USB acting as a virtual serial port. No CR character is required after any command. Speed settings of the virtual serial port can be any value.

Data sheet  
E201D01\_07

## Command set E201-9B

DLL API and serial ASCII command interface are available upon request.  
Software is available only for encoders with bidirectional BiSS-C and valid Electronic Datasheet (EDS).

## Command set E201-9Q

ASCII COMMAND	ACTION	INTERFACE RESPONSE (with example)
v	E201-9Q returns software version + CR	E201-9Q V1.18 + CR
s	Interface serial number in 8 Hex numbers	aaaaaaaa : bbbbbbbb : cccccccc + CR
r	Interface product serial number (6 characters; written on Interface housing)	51X499 + CR nnnnnn + CR where: n = product serial number
?	Encoder position E201-9Q returns 3 decimal values (width not fixed) separated by colons and terminated with CR	3412:2598:1 + CR nnnn:rr:ssss + CR where: n = encoder count r = count value when reference/index was last seen s = status (status value of 1 shows that a reference was detected – use 'c' command to clear)
!	Encoder position E201-9Q returns 4 decimal values (width not fixed) separated by colons and terminated with CR	3412:2598:1:3574 + CR nnnn:rr:ssss:tttt + CR where: n = encoder count r = count value when reference/index was last seen s = status (status value of 1 shows that a reference was detected – use 'c' command to clear) t = timestamp of position in µs  Note: available in E201 interface version 1.18 (and later)
>	Encoder position E201-9Q returns 24 character hexadecimal string + CR comprising 3 sets of 8 character hexadecimal strings	0000d540000a240000001 + CR nnnnnnnnrrrrrrssssssss + CR where: n = encoder count (signed 32 bit) r = count value when reference/index last seen (signed 32 bit) s = status (status value of 1 shows that a reference was detected – use 'c' command to clear)
<	Encoder position E201-9Q returns 32 character hexadecimal string + CR comprising 4 sets of 8 character hexadecimal strings	0000000000000000000000003425fd8 + CR nnnnnnnnrrrrrrsssssstttttt + CR where: n = encoder count r = count value when reference/index was last seen s = status t = timestamp of position in µs Note: Available in E201 interface version 1.18 (and later)
I	Begin Index mode. On every reference/index E201-9Q returns position as 8 character hexadecimal string	On command: no response On index: I = 0000ec9 + CR I = nnnnnnnn + CR where: n = encoder count on reference/index
i	Stop Index mode (stops returning position on every reference/index)	-
c	E201-9Q clears reference status flag	-
z	E201-9Q sets current count value to zero (this also affects reference mark position)	-
a	E201-9Q clears zero offset value stored by 'z' command	-
e	Read encoder supply status, voltage and current consumption (fixed width)	1 : 4.975 V : 0070 mA + CR s : a.aaa V : bbbb mA + CR
n	Turn on power supply to encoder (default at power-up)	ON + CR
f	Turn off power supply to encoder	OFF + CR
p	Status of hardware input pins on interface (0 or 1)	110 + CR abz + CR
! (lowercase)	Begin auto transmission of encoder position in decimal form at 1 kHz rate	1234 + CR nnnn + CR
0	Stop auto transmission	-



## Command set E201-9S

ASCII COMMAND	ACTION	INTERFACE RESPONSE (with example)	SSI encoder	BiSS encoder
<b>v</b>	E201-9S returns software version + CR	E201-9S V1.18 + CR	✓	✓
<b>s</b>	Interface serial number in 8 Hex numbers	aaaaaaaa : bbbbbbbb : cccccccc + CR	✓	✓
<b>r</b>	Interface product serial number (8 characters; written on Interface housing)	78J077 + CR nnnnnn + CR where: n = product serial number	✓	✓
<b>?</b>	Encoder position E201-9S returns encoder position in decimal representation (width not fixed)	1234 + CR nnnn + CR where: n = encoder count	✓	
<b>&gt;</b>	Encoder position E201-9S returns 8 Hex digits with encoder position	00000d54 + CR nnnnnnnn + CR where: n = encoder count (signed 32 bit)	✓	
<b>!</b>	Encoder position E201-9Q returns 2 decimal values (width not fixed) separated by colon and terminated with CR	1234:5678 + CR nnnn:tttt + CR where: n = encoder count t = position timestamp in µs	✓	
<b>4</b>	Encoder position E201-9S returns 16 character hexadecimal string + CR comprising 64 SLO bits, synchronised to 64 MA clocks Used for BiSS C-mode (unidirectional) encoders Note: Available in E201 interface version 1.18 (and later)	c004c9ba71753000 + CR nnnnnnnnnnnnnnnn + CR where: n = SLO bits in 16 Hex digits, comprising Aok, Start, Cds (always '0') in BiSS C mode (unidirectional), Position, Status and CRC bits.*		✓
<b>b</b>	Read current word width that is read from encoder	31 bit + CR nn bit + CR	✓	
<b>Bnn+CR</b>	Set word width; n can be one or two characters	OK 31 bit + CR or B param error + CR OK nn bit + CR N = 1 to 31	✓	
<b>m</b>	Read current encoder clock frequency	3 = 140 kHz + CR or 0 = ERROR n = xxx kHz + CR	✓	✓
<b>Mn</b>	Set SSI and BiSS clock frequency: 8 = 4.4 MHz 7 = 2.2 MHz 6 = 1.1 MHz 5 = 560 kHz 4 = 280 kHz 3 = 140 kHz (default) 2 = 70 kHz 1 = 35 kHz	frequency 5 + CR or M param error + CR frequency n + CR where: n = 1 to 7	✓	✓
<b>e</b>	Read encoder supply status, voltage and current consumption (fixed width)	1 : 4.975 V : 0070 mA + CR. s : a.aaa V : bbbb mA + CR	✓	✓
<b>n</b>	Turn on power supply to encoder (default at power-up)	ON + CR	✓	✓
<b>f</b>	Turn off power supply to encoder	OFF + CR	✓	✓
<b>p</b>	Status of hardware input pins on interface	_11 + CR xod + CR x = space character c = clock pin (0 or 1), should be 1 d = data pin (0 or 1), should be 1	✓	✓
<b>1</b>	Begin auto transmission of encoder position in decimal form at 1 kHz rate	1234 + CR nnnn + CR	✓	
<b>0</b>	Stop auto transmission	-	✓	

\* The user must decode the SLO bits into Position, Status and CRC according to the corresponding bit lengths. Eg: If the Position, Status and CRC length is 26 bits, 2 bits and 6 bits respectively, the response c004c9ba71753000 is decoded as 0x19374E2 (Position), 0x03 (Status) and 0x2A (CRC,  $x^6 + x + 1$  polynomial, inverted).

Additional information can be found in the document E201D02 "E201-9S Application note: Decoding the BiSS information" available for download at [www.rls.si/E201](http://www.rls.si/E201)

A **RENISHAW** associate company



## Head office

RLS merilna tehnika d.o.o.  
Poslovna cona Žeje pri Komendi  
Pod vrbbami 2  
SI-1218 Komenda  
Slovenia

T +386 1 5272100  
F +386 1 5272129  
E mail@rls.si  
www.rls.si

## Document issues

Issue	Date	Page	Corrections made
1	12. 4. 2011	-	New document
2	14. 3. 2013	5 and 6	Added BIOS - C mode and Command set in E201-9B and E201-9Q
3	14. 7. 2014	2, 3, 4	Dimension drawings added; windows compatibility updated
4	24. 9. 2015	2, 5, 6	Minor text changes in Command set tables, 4.4 MHz added on the E201-9B Interface, E201-9Q count frequency amended, Cable length added, Linux support added.
5	1. 2. 2016	2	Maximum count rate amended and Mac OS X added
		3, 4	Mac OS X system added
6	10. 9. 2018	2, 8	E201-9B version added, Win 10 ompatibility added
7	28. 11. 2019	2-4	Linux comment added

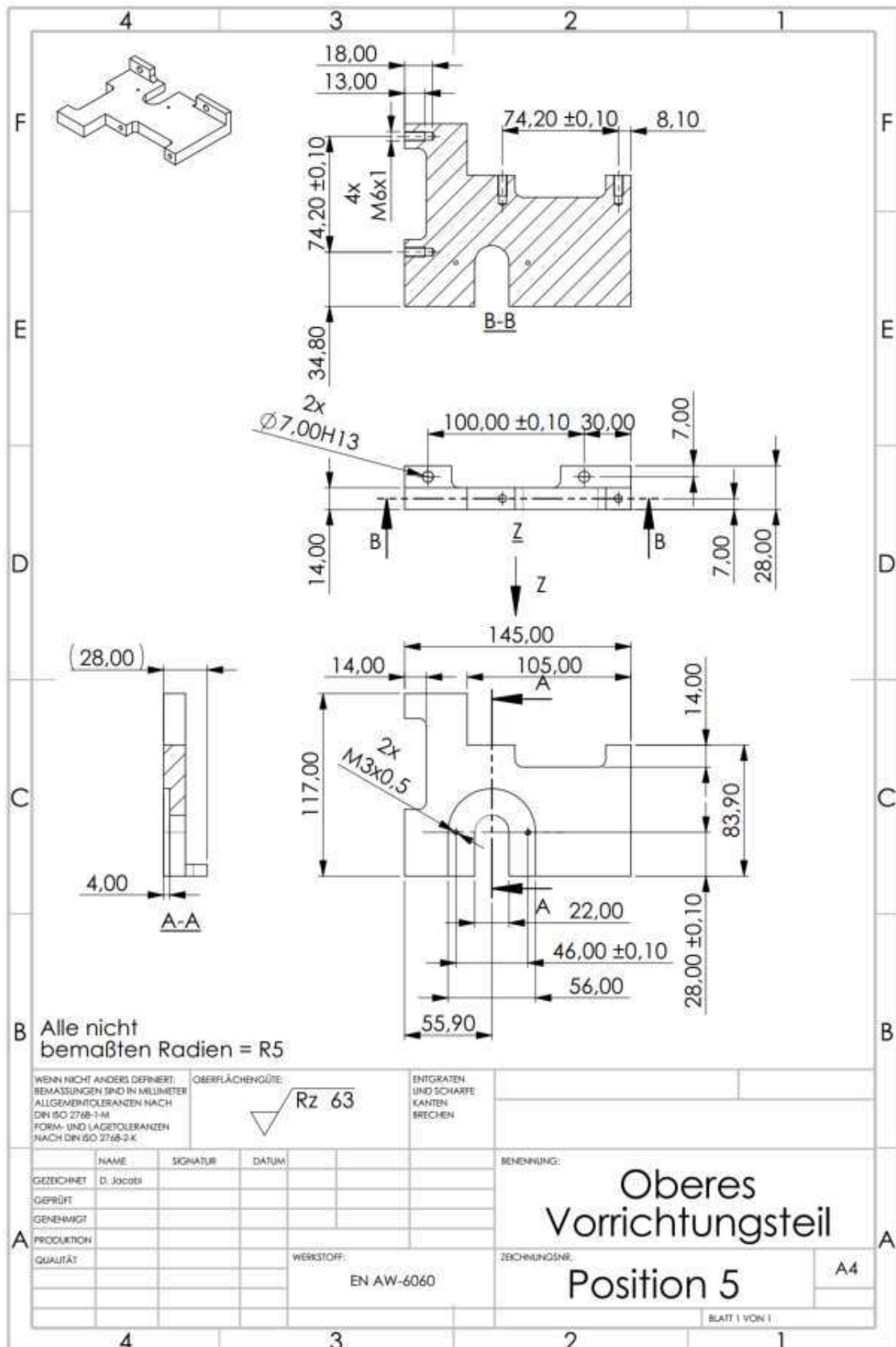
This product is not designed or intended for use outside the environmental limitations and operating parameters expressly stated on the product's datasheet. Products are not designed or intended for use in medical, military, aerospace, automotive or oil & gas applications or any safety-critical applications where a failure of the product could cause severe environmental or property damage, personal injury or death. Any use in such applications must be specifically agreed to by seller in writing, and is subject to such additional terms as the seller may impose in its sole discretion. Use of products in such applications is at buyer's own risk, and buyer will indemnify and hold harmless seller and its affiliates against any liability, loss, damage or expense arising from such use. Information contained in this datasheet was derived from product testing under controlled laboratory conditions and data reported thereon is subject to the stated tolerances and variations, or if none are stated, then to tolerances and variations consistent with usual trade practices and testing methods. The product's performance outside of laboratory conditions, including when one or more operating parameters is at its maximum range, may not conform to the product's datasheet. Further, information in the product's datasheet does not reflect the performance of the product in any application, end-use or operating environment buyer or its customer may put the product to. Seller and its affiliates make no recommendation, warranty or representation as to the suitability of the product for buyer's application, use, end-product, process or combination with any other product or as to any results buyer or its customer might obtain in their use of the product. Buyer should use its own knowledge, judgment, expertise and testing in selecting the product for buyer's application, end-use and/or operating environment, and should not rely on any oral or written statement, representation, or samples made by seller or its affiliates for any purpose. EXCEPT FOR THE WARRANTIES EXPRESSLY SET FORTH IN THE SELLER'S TERMS AND CONDITIONS OF SALE, SELLER MAKES NO WARRANTY EXPRESS OR IMPLIED WITH RESPECT TO THE PRODUCT, INCLUDING ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR ANY PARTICULAR PURPOSE, WHICH ARE DISCLAIMED AND EXCLUDED. All sales are subject to seller's exclusive terms and conditions of sale which, where the seller is (a) RLS merilna tehnika d.o.o., are available at <https://www.rls.si/customer-service>, (b) Renishaw, Inc., are available at <http://www.renishaw.com/Shop/legal/en-42185>, or (c) another person, are available on request, and in each case, are incorporated herein by reference, and are the exclusive terms of sale. No other terms and conditions apply. Buyer is not authorized to make any statements or representations that expand upon or extend the environmental limitations and operating parameters of the products, or which imply permitted usage outside of that, expressly stated on the datasheet or agreed to in writing by seller.

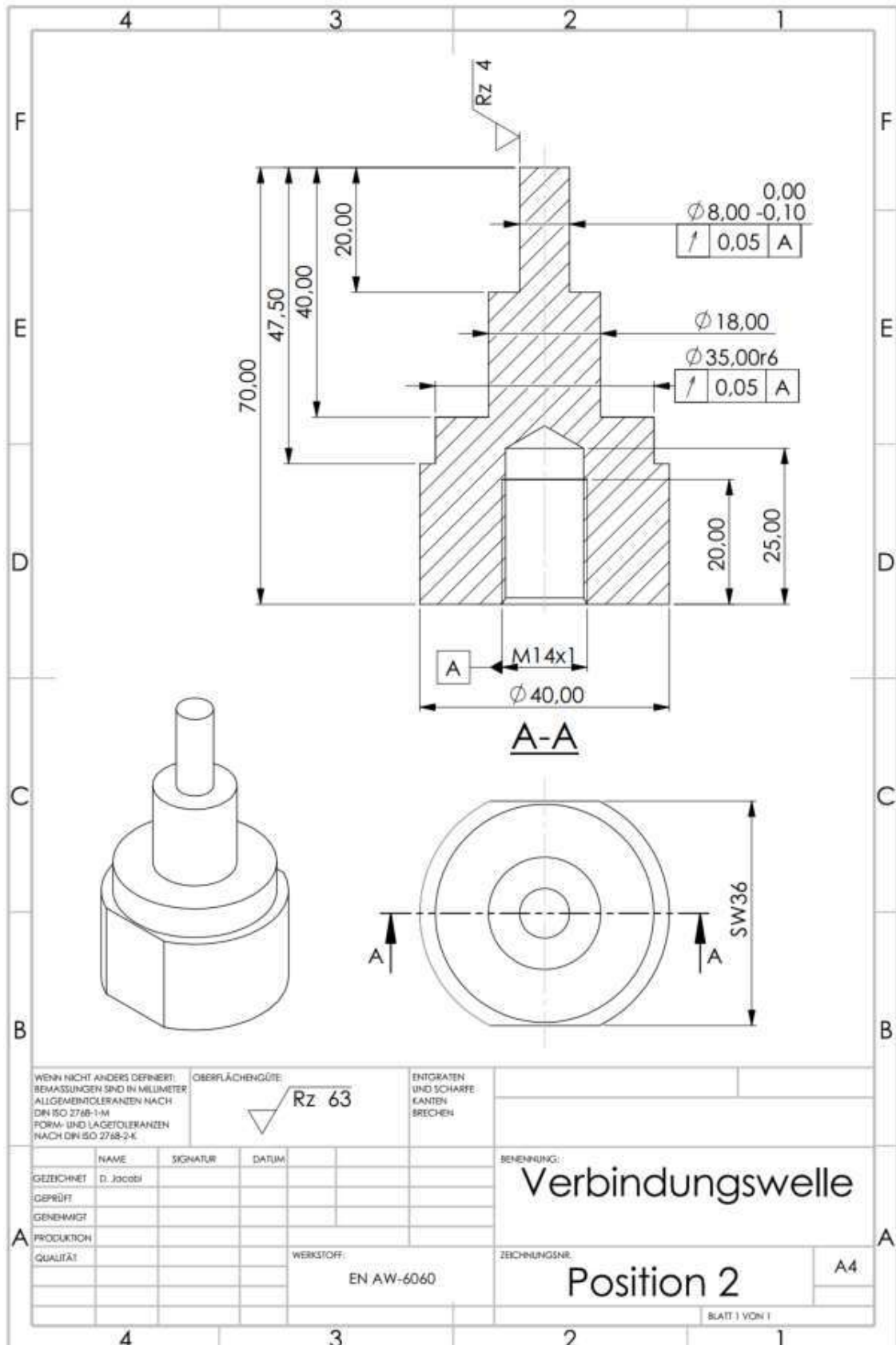
RLS merilna tehnika d.o.o. has made considerable effort to ensure the content of this document is correct at the date of publication but makes no warranties or representations regarding the content. RLS merilna tehnika d.o.o. excludes liability, howsoever arising, for any inaccuracies in this document. © 2019 RLS d.o.o.

A **RENISHAW** associate company

## Anhang B – Bauteilspezifikationen & Zeichnungen

<b>Zukaufteile</b>	
<b>Montagevorrichtung</b>	
<b>6-Loch Adapterflansch (Pos. 3)</b>	<a href="https://www.ebay.de/itm/374310793352?chn=ps&amp;var=643190432354&amp;_trkparms=ispr%3D1&amp;amdata=enc%3A1-y8X3gRNQN6nYi76J3VTQw44&amp;noover=1&amp;mkevt=1&amp;mkrid=707-134425-41852-">https://www.ebay.de/itm/374310793352?chn=ps&amp;var=643190432354&amp;_trkparms=ispr%3D1&amp;amdata=enc%3A1-y8X3gRNQN6nYi76J3VTQw44&amp;noover=1&amp;mkevt=1&amp;mkrid=707-134425-41852-</a>
<b>Bremsscheibe (Pos. 4)</b>	Shimano BR-RT66; Hersteller ArtikelNr.: ESMRT66S; Edelstahl
<b>Bremssättel &amp; -hebel (Pos. 7)</b>	Shimano BR-MT201; Hersteller ArtikelNr.: EMT201KLPRA100+EMT201KRRXRA170
<b>Aluminiumprofile (Pos. 8)</b>	Bosch Rexroth Profilstreben 40x40; Eloxiertes Aluminium
<b>Inkremental Drehgeber (Pos. 6)</b>	Kübler 8.KIH40.5462.2048 Optisch Sackloch-Hohlwelle 46 mm, Bestell-Nr.: 1656617 - 62, Hst.Teile-Nr.: F000431A





## Anhang C – Programmcode für Geschwindigkeits- erfassung

```
... \Code\SpeedMeasurement\DBikeSimSpeedMeasurement.cpp 1
1  /**
2  * \file DBikeSimSpeedMeasurement.cpp
3  *
4  * Copyright (C) 2010, 2019 DLR TS. All rights reserved.
5  */
6  #define _USE_MATH_DEFINES
7  #include "BikeSimSpeedMeasurement/include/DBikeSimSpeedMeasurement.h"
8  #include <algorithm>
9  #include <string>
10
11 /**
12 * The initialization routine for this module.
13 */
14 void DBikeSimSpeedMeasurement::init(void)
15 {
16     printf("***** IN INIT *****\n");
17
18     WheelRadius = atof(getenv("WheelRadius") != 0 ? getenv      ↗
19         ("WheelRadius") : std::to_string(WheelRadius).c_str());
20     printf("Using WheelRadius: %.2f [Set Environment Variable      ↗
21         \"WheelRadius\" [m] to change the default value\n", WheelRadius);
22
23     COM_Port = getenv("COM-Port") != 0 ? getenv("COM-Port") : COM_Port;
24     printf("Using COM-Port: %s [Set Environment Variable \"COM-Port\" ↗
25         to change the default value\n", COM_Port);
26
27     Baudrate = atoi(getenv("Baudrate") != 0 ? getenv("Baudrate") : ↗
28         std::to_string(Baudrate).c_str());
29     printf("Using Baudrate: %d [Set Environment Variable \"Baudrate\" ↗
30         to change the default value\n", Baudrate);
31
32     // open handle etc.
33     IOErrorCode = IO_Object.OpenPort(COM_Port.c_str(), Baudrate, 8, 1, ↗
34         0);
35     IsIoError = IOErrorCode != 0;
36     t_end = std::chrono::high_resolution_clock::now();
37
38     if (!IsIoError)
39     {
40         int bytesWritten = 0;
41         int bufferSize = 0;
42         int bytesReceived = 0;
43         IO_Object.DirectCommunication("z", 1, bytesWritten, bufferSize, ↗
44             bytesReceived, false);
45     }
46
47     printf("***** INIT Done *****\n");
48 }
49
50 /**
51 * The deinitialization routine for this module.
52 */
53 void DBikeSimSpeedMeasurement::exit(void)
```

```
... \Code \SpeedMeasurement \DBikeSimSpeedMeasurement.cpp 2
47 {
48     /* You have access to the member variables input, output and
      parameter. */
49     printf("***** RUN Done *****\n");
50     printf("***** IN EXIT *****\n");
51
52     if (IO_Object.ClosePort())
53     {
54         printf("COM-Port closed successfully .. \n");
55     }
56     else
57     {
58         printf("COM-Port closed unsuccessfully .. \n");
59     }
60
61     printf("***** EXIT Done *****\n");
62 }
63
64 /**
65  * The actual runnable function of this very module.
66  */
67 void DBikeSimSpeedMeasurement::run(void)
68 {
69     if (IsFirstRun)
70     {
71         printf("***** IN RUN *****\n");
72         IsFirstRun = false;
73     }
74
75
76     if (!IsIoError)
77     {
78         int bytesWritten = 0;
79         int bytesReceived = 0;
80         int bufferSize = 25;
81
82         std::string command = ">";
83         int32_t encoderPosition = 0;
84         int32_t refPoint = 0;
85         int32_t isRefPointActive = 0;
86
87         //printf("\r EncoderInfo.. Raw Response: \");
88         char* response = nullptr;
89
90         response = IO_Object.DirectCommunication(command.c_str(), 1,
          bytesWritten, bufferSize, bytesReceived);
91         if (bytesWritten < 0 || bytesReceived < 0)
92         {
93             printf("Failed to Communicate with USB: bytesWritten: %i
          bytesReceived: %i\n", bytesWritten, bytesReceived);
94             IsIoError = true;
95         }
96         else
```

```
... \Code\SpeedMeasurement\DBikeSimSpeedMeasurement.cpp 3
97     {
98         if (response != nullptr) {
99
100             std::string str_response(response, bytesReceived);
101
102             //std::replace(str_response.begin(), str_response.end
103             //    (), '\r', ' ');
104
105             //split response and convert datasets to decimal value
106             encoderPosition = std::stoul(str_response.substr(0,
107             //    8).c_str(), nullptr, 16);
108             refPoint = std::stoul(str_response.substr(8, 8).c_str
109             //    (), nullptr, 16);
110             isRefPointActive = std::stoul(str_response.substr(16,
111             //    8).c_str(), nullptr, 16);
112
113             //printf(" Encoder Pos: %d ", encoderPosition);
114         }
115         else
116         {
117             printf("Invalid Char Array\n");
118             IsIoError = true;
119         }
120     }
121
122 }
123
124 afterRunAndCulculation =
125     std::chrono::high_resolution_clock::now();
126
127 double delta_time_ms = std::chrono::duration<double,
128     //    std::milli>(afterRunAndCulculation - t_end).count();
129 double velocity = (WheelRadius * 2 * M_PI * ((abs
130     //    (encoderPosition - IncCount_LastCylce)) /
131     //    ENCODER_RESOLUTION) / (delta_time_ms / 1000.0)) /
132     //    GEAR_RATIO_BIKE_AND_TRAINER;
133 IncCountTotal = abs(encoderPosition);
134
135 printf("DeltaTime %.2fms Encoder: %d Speed: %.2fm/s
136     //    \r", delta_time_ms, encoderPosition, velocity);
137
138 _output.MoSAIC.BikeInstance[0].SpeedMeasurement.ForwardVelocity
139     //    = velocity;
140 _output.MoSAIC.BikeInstance
141     //    [0].SpeedMeasurement.DistanceTravelledFromLastCycle =
142     //    WheelRadius * 2 * M_PI * ((abs(encoderPosition -
143     //    IncCount_LastCylce)) / ENCODER_RESOLUTION);
144 _output.MoSAIC.BikeInstance
```

```
... \Code\SpeedMeasurement\DBikeSimSpeedMeasurement.cpp 4
    [0].SpeedMeasurement.IncrementalCounterTotal = IncCountTotal;
136
137     // prepare next Cycle
138     t_end = std::chrono::high_resolution_clock::now();
139     IncCount_LastCylce = encoderPosition;
140
```

# Anhang D – 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=RFmfq9XX87Cb..>

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"/>
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"/>

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 stimmten 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"/>	<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"/>	<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"/>	<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"/>	<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"/>	<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"/>	<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!**

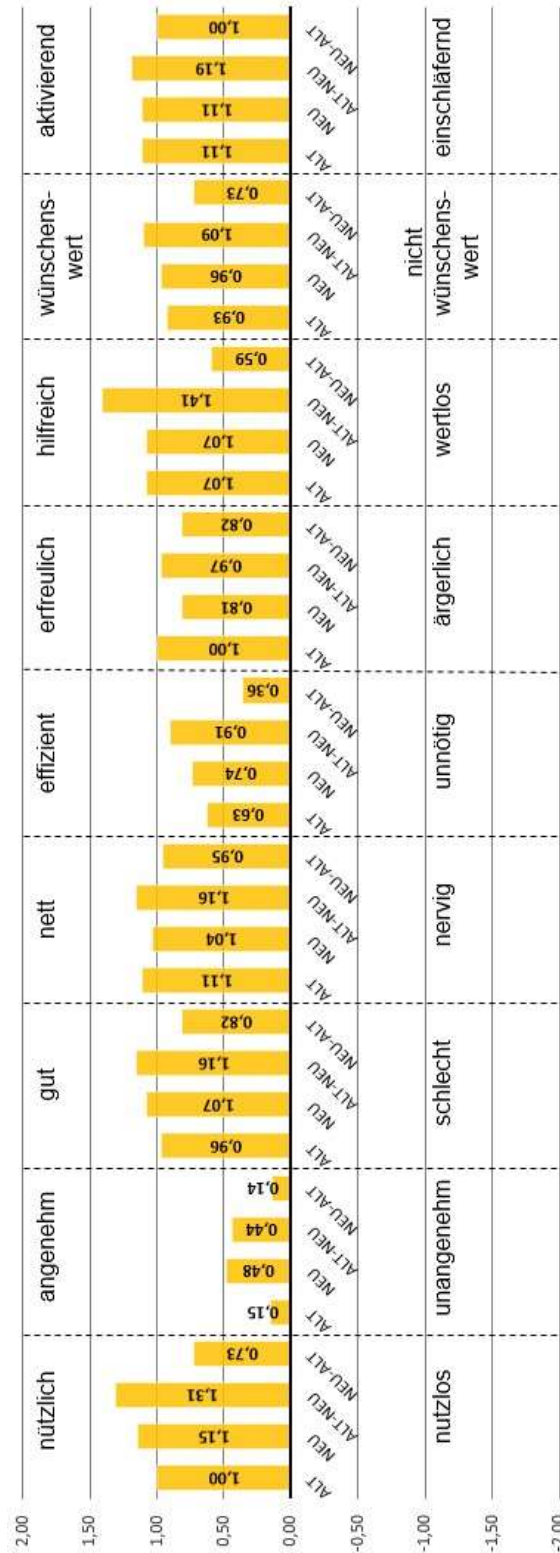
Ihre Antworten wurden gespeichert, Sie können das Browser-Fenster nun schließen.

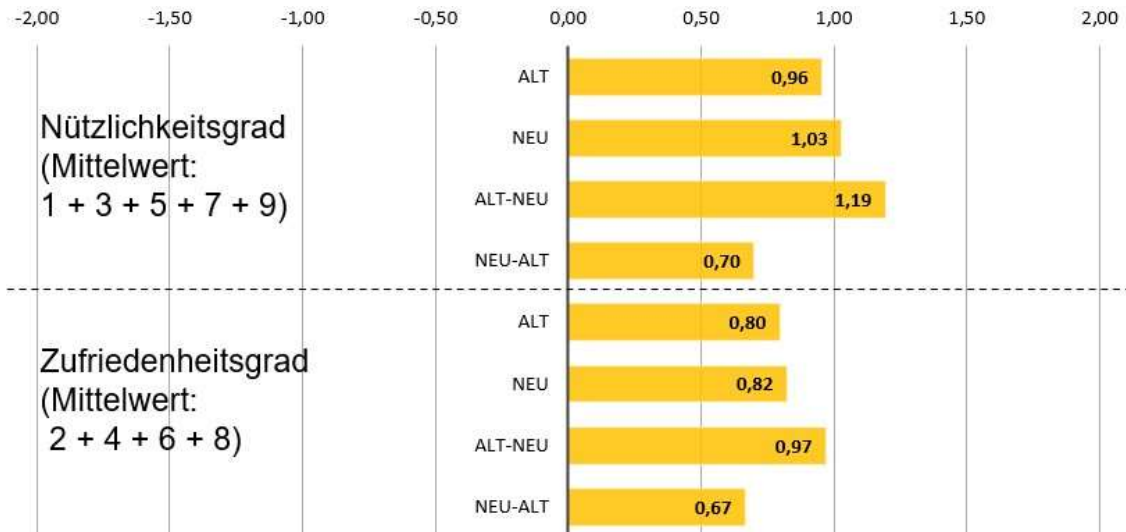
---

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

# Anhang E – Auswertung der Validierungsstudie

## 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
Zufrieden- heits- 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)

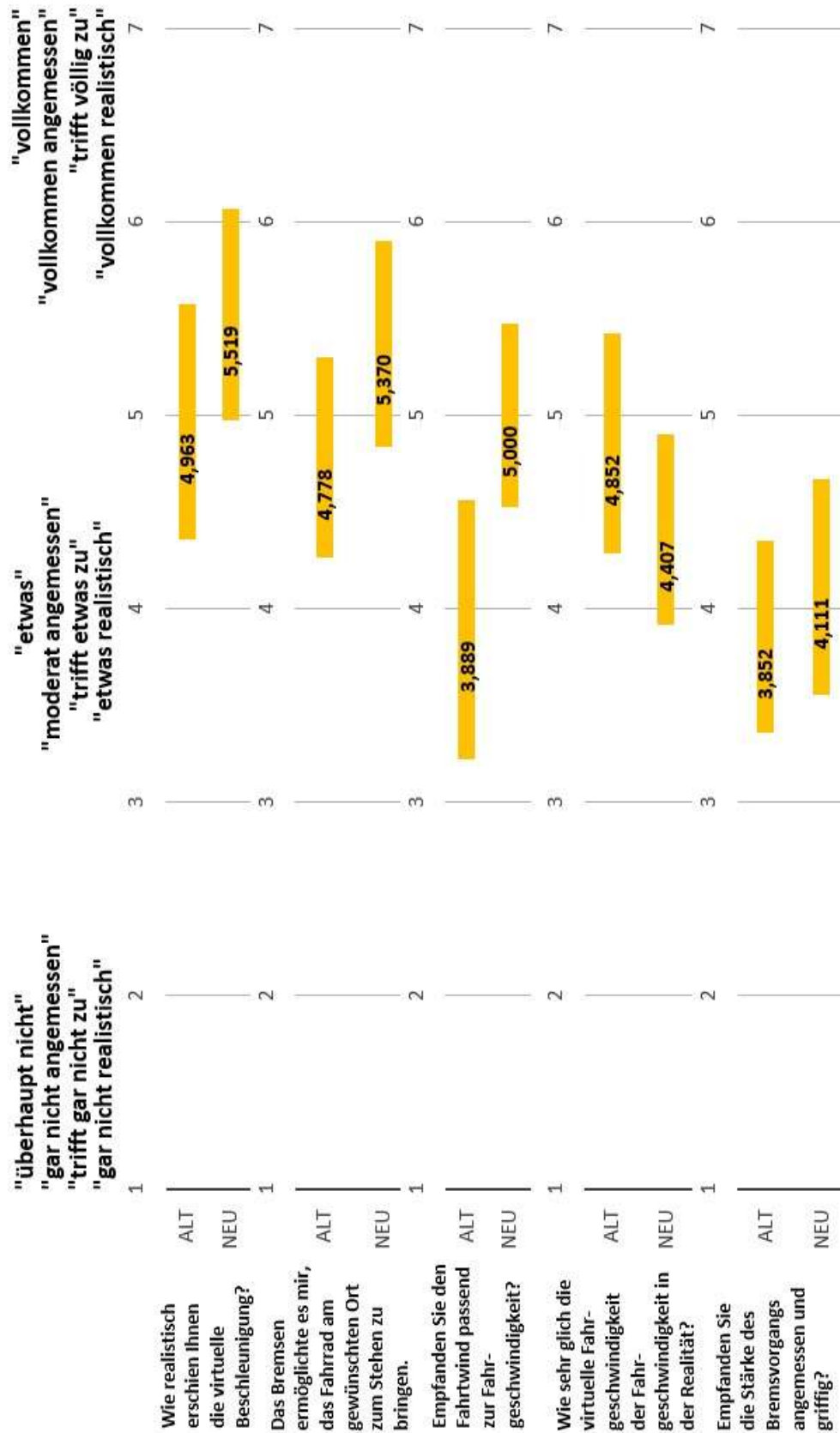
<i>Akzeptanz: nützlich/nutzlos</i>	<i>Alt gesamt</i>	<i>Neu gesamt</i>
Mittelwert	1,000	1,148
Varianz	0,615	0,516
Beobachtungen	27,000	27,000
Pearson Korrelation	0,819	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0,000	
Freiheitsgrade (df)	26,000	
t-Statistik	-1,688	
P(T<=t) einseitig	0,052	
Kritischer t-Wert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

## Realitätsgradauswertung

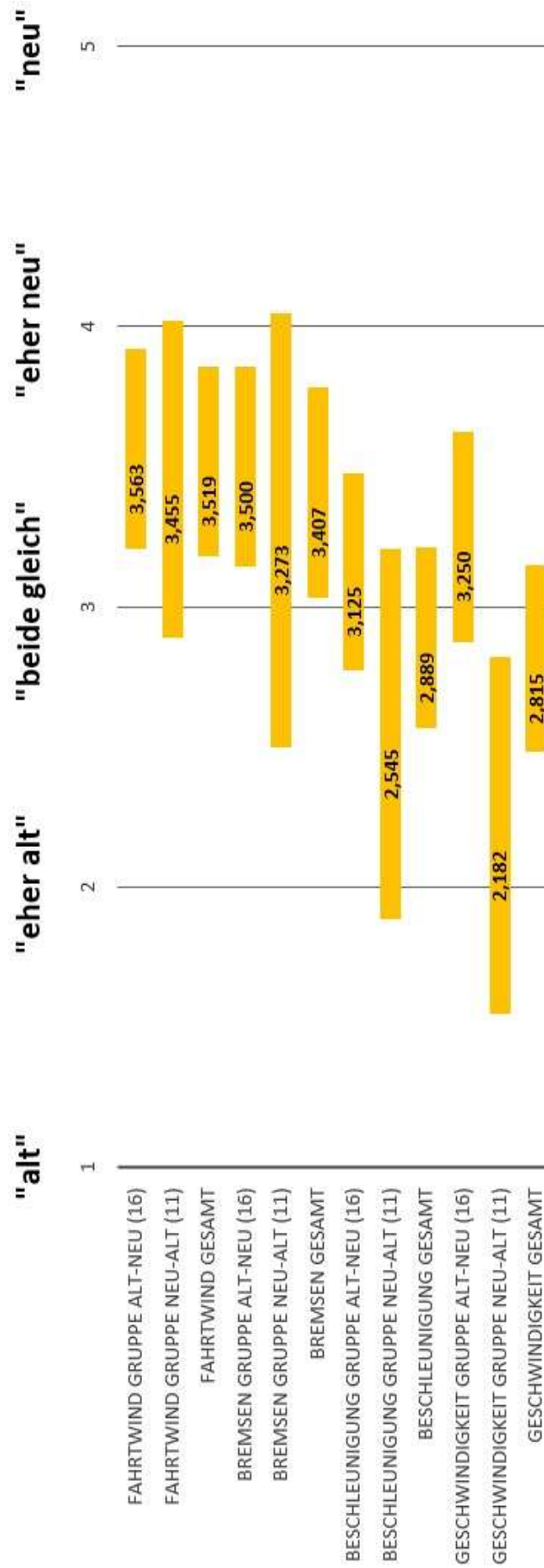


			$\bar{X}$	$s$	$n$	$t_c$	$uCI$	$oCI$	$\frac{\Delta CI}{2}$
Beschleunigung	Fahrprofil	Alt	4,963	1,850	27	1,706	4,356	5,570	0,607
		Neu	5,519	1,673	27	1,706	4,969	6,068	0,549
Fahrtwind	Fahrprofil	Alt	3,889	2,044	27	1,706	3,218	4,560	0,671
		Neu	5,000	1,441	27	1,706	4,527	5,473	0,473
Fahrgeschwindigkeit	Fahrprofil	Alt	4,852	1,725	27	1,706	4,285	5,418	0,567
		Neu	4,407	1,500	27	1,706	3,915	4,900	0,493
Bremsen	Fahrprofil	Alt	4,778	1,577	27	1,706	4,260	5,296	0,518
		Neu	5,370	1,621	27	1,706	4,838	5,902	0,532
Stärke der Bremsen	Fahrprofil	Alt	3,852	1,512	27	1,706	3,356	4,348	0,496
		Neu	4,111	1,695	27	1,706	3,555	4,667	0,556

Zweistichproben t-Test bei abhängigen Stichproben  
(Paarvergleichstest)

	<i>Alt gesamt</i>	<i>Neu gesamt</i>
<b>Beschleunigung / QL02</b>		
Mittelwert	4,963	5,519
Varianz	3,422	2,798
Beobachtungen	27,000	27,000
Pearson Korrelation	-0,168	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0,000	
Freiheitsgrade (df)	26,000	
t-Statistik	-1,072	
P(T<=t) einseitig	0,147	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,315	
P(T<=t) zweiseitig	0,294	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	1,706	
<b>Fahrtwind / QL03</b>		
Mittelwert	3,889	5,000
Varianz	4,179	2,077
Beobachtungen	27,000	27,000
Pearson Korrelation	0,718	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0,000	
Freiheitsgrade (df)	26,000	
t-Statistik	-4,057	
P(T<=t) einseitig	0,000	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,315	
P(T<=t) zweiseitig	0,000	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	1,706	
<b>Fahrgeschwindigkeit / QL04</b>		
Mittelwert	4,852	4,407
Varianz	2,977	2,251
Beobachtungen	27,000	27,000
Pearson Korrelation	0,455	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0,000	
Freiheitsgrade (df)	26,000	
t-Statistik	1,363	
P(T<=t) einseitig	0,092	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,315	
P(T<=t) zweiseitig	0,185	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	1,706	

<i>Bremsen / QL05</i>	<i>Alt gesamt</i>	<i>Neu gesamt</i>
Mittelwert	4,778	5,370
Varianz	2,487	2,627
Beobachtungen	27,000	27,000
Pearson Korrelation	0,545	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0,000	
Freiheitsgrade (df)	26,000	
t-Statistik	-2,018	
P(T<=t) einseitig	0,027	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,315	
P(T<=t) zweiseitig	0,054	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	1,706	
<i>Stärke Bremse / QL11</i>	<i>Alt gesamt</i>	<i>Neu gesamt</i>
Mittelwert	3,852	4,111
Varianz	2,285	2,872
Beobachtungen	27,000	27,000
Pearson Korrelation	0,532	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0,000	
Freiheitsgrade (df)	26,000	
t-Statistik	-0,864	
P(T<=t) einseitig	0,198	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,315	
P(T<=t) zweiseitig	0,395	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	1,706	



		$\bar{X}$	$s$	$n$	$t_c$	$uCI$	$oCI$	$\frac{\Delta CI}{2}$
Bei welchem Durchgang empfanden Sie den Fahrtwind realitätsgetreuer?	Fahrtwind Gruppe Alt-Neu	3,563	0,814	16	1,753	3,206	3,919	0,357
	Fahrtwind Gruppe Neu-Alt	3,455	1,036	11	1,812	2,889	4,020	0,566
	Fahrtwind gesamt	3,519	1,027	27	1,706	3,181	3,856	0,337
Bei welchem Durchgang empfanden Sie das Bremsen realitätsgetreuer?	Bremsen Gruppe Alt-Neu	3,500	0,816	16	1,753	3,142	3,858	0,358
	Bremsen Gruppe Neu-Alt	3,273	1,421	11	1,812	2,497	4,049	0,776
	Bremsen gesamt	3,407	1,145	27	1,706	3,032	3,783	0,376
Bei welchem Durchgang empfanden Sie die Beschleunigung realitätsgetreuer?	Beschleunigung Gruppe Alt-Neu	3,125	0,806	16	1,753	2,772	3,478	0,353
	Beschleunigung Gruppe Neu-Alt	2,545	1,214	11	1,812	1,882	3,208	0,663
	Beschleunigung gesamt	2,889	0,984	27	1,706	2,566	3,212	0,323
Bei welchem Durchgang empfanden Sie die Fahrgeschwindigkeit realitätsgetreuer?	Fahrgeschwindigkeit Gruppe Alt-Neu	3,250	0,856	16	1,753	2,875	3,625	0,375
	Fahrgeschwindigkeit Gruppe Neu-Alt	2,182	1,168	11	1,812	1,544	2,820	0,638
	Fahrgeschwindigkeit gesamt	2,815	1,014	27	1,706	2,482	3,148	0,333

Zweistichproben t-Test bei abhängigen Stichproben  
(Paarvergleichstest)

	<i>Fahrtwind</i>	<i>Bremsen</i>
Mittelwert	3,519	3,407
Varianz	0,798	1,174
Beobachtungen	27,000	27,000
Pearson Korrelation	0,290	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0,000	
Freiheitsgrade (df)	26,000	
t-Statistik	0,486	
P(T<=t) einseitig	0,315	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,315	
P(T<=t) zweiseitig	0,631	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	1,706	

	<i>Fahrtwind</i>	<i>Beschleunigung</i>
Mittelwert	3,519	2,889
Varianz	0,798	1,026
Beobachtungen	27,000	27,000
Pearson Korrelation	0,194	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0,000	
Freiheitsgrade (df)	26,000	
t-Statistik	2,696	
P(T<=t) einseitig	0,006	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,315	
P(T<=t) zweiseitig	0,012	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	1,706	

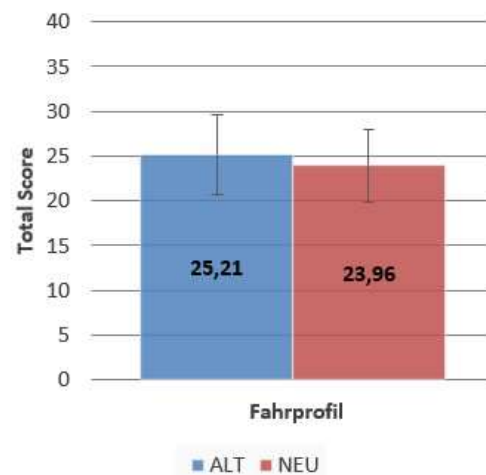
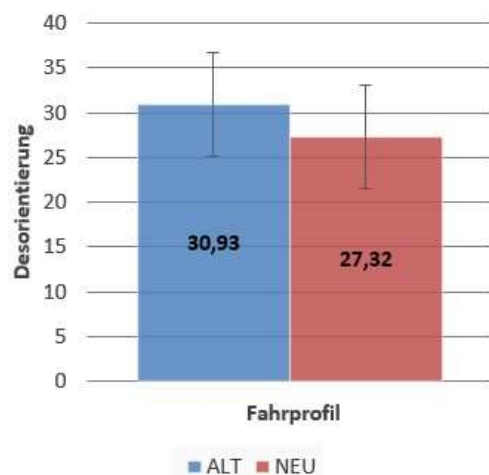
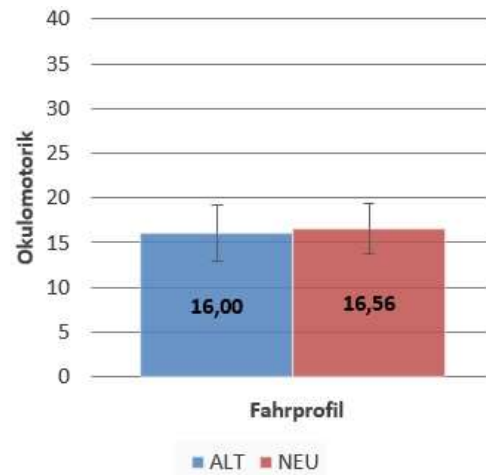
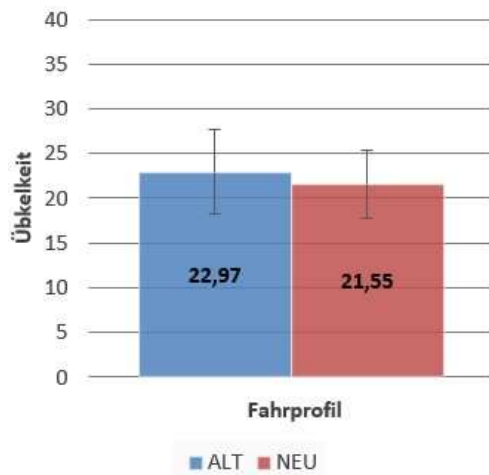
	<i>Fahrtwind</i>	<i>Fahrgeschwindigkeit</i>
Mittelwert	3,519	2,815
Varianz	0,798	1,234
Beobachtungen	27,000	27,000
Pearson Korrelation	0,217	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0,000	
Freiheitsgrade (df)	26,000	
t-Statistik	2,890	
P(T<=t) einseitig	0,004	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,315	
P(T<=t) zweiseitig	0,008	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	1,706	

	<i>Bremsen</i>	<i>Beschleunigung</i>
Mittelwert	3,407	2,889
Varianz	1,174	1,026
Beobachtungen	27,000	27,000
Pearson Korrelation	0,499	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0,000	
Freiheitsgrade (df)	26,000	
t-Statistik	2,563	
P(T<=t) einseitig	0,008	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,315	
P(T<=t) zweiseitig	0,017	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	1,706	

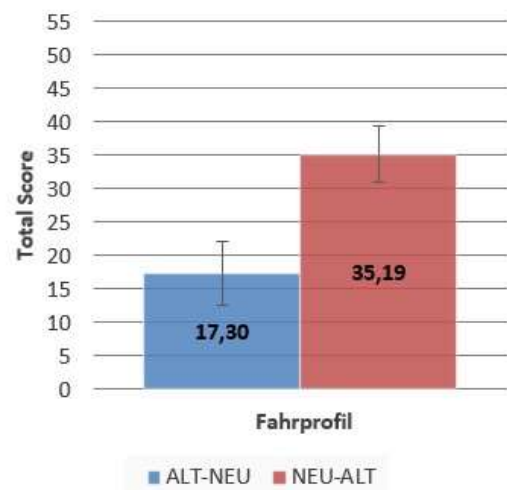
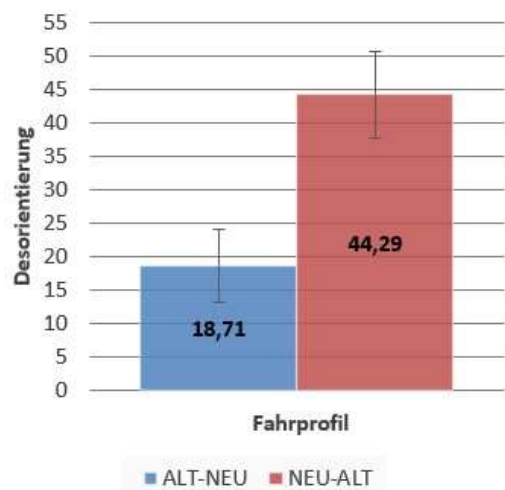
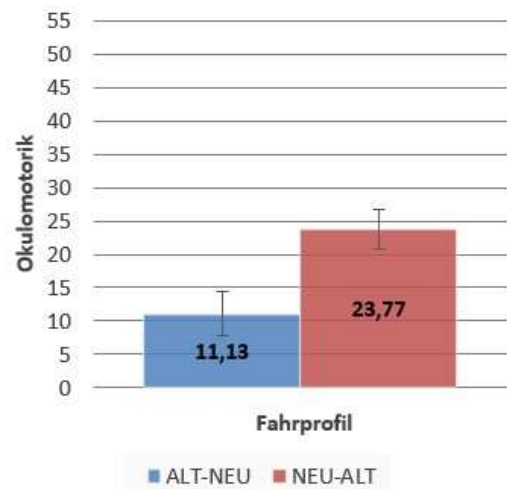
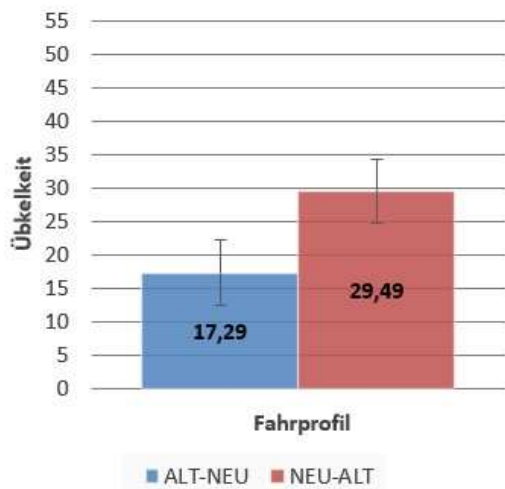
	<i>Bremsen</i>	<i>Fahrgeschwindigkeit</i>
Mittelwert	3,407	2,815
Varianz	1,174	1,234
Beobachtungen	27,000	27,000
Pearson Korrelation	0,385	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0,000	
Freiheitsgrade (df)	26,000	
t-Statistik	2,530	
P(T<=t) einseitig	0,009	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,315	
P(T<=t) zweiseitig	0,018	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	1,706	

	<i>Fahrgeschwindigkeit</i>	<i>Beschleunigung</i>
Mittelwert	2,889	2,815
Varianz	1,026	1,234
Beobachtungen	27,000	27,000
Pearson Korrelation	0,665	
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	

## Simulatorkrankheit-Auswertung



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



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