

Methodische Implikationen zur Herstellung von Motion Sickness im Realfahrzeug

Evaluation eines standardisierten Fahrprofils im öffentlichen Verkehr

Methodological implications for the induction of motion sickness in real vehicle studies

Evaluation of a standardized driving profile on open roads

M.Sc. **M. Metzulat**; Dr. rer. pol. **A. Landau**; Dr. phil. **B. Metz**
Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (WIVW), Veitshöchheim

Kurzfassung

Motion Sickness wird beim automatisierten Fahren ein nicht zu vernachlässigendes Problem darstellen. Für die Erforschung des Phänomens sind experimentelle Studien nötig, in denen Motion Sickness zuverlässig hergestellt werden kann. In dieser Studie wurde ein (soweit bekannt) neuartiges Studiendesign evaluiert, bei dem ein definiertes Fahrprofil auf öffentlichen (verkehrsarmen) Straßen gefahren wurde. Es wurden dynamische Fahrmanöver mit hoher Längs- oder Querschleunigung mit visuellen Nebenaufgaben kombiniert und im Ausmaß der erzeugten Motion Sickness verglichen. N = 20 Personen erlebten an drei verschiedenen Tagen jeweils eine Fahrt auf dem Beifahrersitz. Insgesamt konnte im Mittel ein mittleres bis hohes Motion Sickness Level erzeugt werden. Im Mittel stieg die Motion Sickness bei den Fahrmanövern mit Querschleunigung signifikant stärker an als bei den Fahrmanövern mit Längsbeschleunigung. Mit dem Setting konnten vergleichbare Fahrprofile hergestellt werden. Die Ergebnisse sprechen für die Anwendbarkeit des gewählten Designs. Es werden methodische Implikationen für Studien im Realfahrzeug abgeleitet.

Abstract

Motion sickness will be a considerable problem in automated driving. Experimental studies in which motion sickness can be reliably produced are necessary for investigating the phenomenon. In this study, a novel study design was evaluated in which a defined driving profile was driven on public (low-traffic) roads. Dynamic driving manoeuvres with high longitudinal or lateral acceleration were combined with visual secondary tasks and compared in the extent of induced motion sickness. N = 20 participants experienced an experimental drive in the passenger seat on three different days. On average, a medium to high level of motion sickness was generated. In the lateral driving manoeuvres, the motion sickness

increased significantly higher than in the longitudinal manoeuvres. With the setting, comparable driving profiles could be produced. The results indicate the applicability of the chosen design. Methodological implications for real vehicle studies are derived.

1. Hintergrund und Fragestellung

Mit der Entwicklung höherer Automationsstufen wird der Fahrer nicht mehr für die Fahraufgabe zuständig sein und folglich immer mehr zum Beifahrer. Dadurch kann der Fahrer während der Fahrt einer Vielzahl von nicht fahrbezogenen Aktivitäten nachgehen, z. B. lesen, arbeiten, Videos ansehen usw. Die Beschäftigung mit Aufgaben, die visuelle Aufmerksamkeit erfordern, erhöht jedoch das Risiko, Symptome von Motion Sickness (Kinetose) zu erleben [1, 2]. Infolgedessen ist nicht nur das Komforterleben, sondern womöglich auch die Akzeptanz des automatisierten Fahrens gefährdet [1, 3]. Motion Sickness ist eine natürliche Reaktion auf eine Diskrepanz zwischen wahrgenommener und tatsächlicher Bewegung [4]. Es gibt verschiedene Theorien zur Entstehung. Eine der meist Zitiertesten ist die Theorie des Sensorischen Konflikts, welche annimmt, dass Motion Sickness auftritt, wenn ein Konflikt zwischen den Sinneseindrücken besteht, d.h. zwischen visuellen, vestibulären und nicht vestibulären Systemen, wie Propriozeption [5]. Zu den Symptomen zählen u.a. Müdigkeit, Schwindel, Kopfschmerzen, (kalter) Schweiß, Aufstoßen, flauer Magen, wobei das vorherrschende Symptom meist Übelkeit ist, welche bis hin zu Erbrechen führen kann [6-8]. Häufige Fragestellungen bezüglich Motion Sickness im Kontext des automatisierten Fahrens sind beispielsweise eine valide Schätzung der Prävalenz, Verständnis der beeinflussenden Faktoren, Entwicklung über die Zeit sowie die Entwicklung von Gegenmaßnahmen. Hierfür sind kontrollierte, experimentelle Studien notwendig, in denen Motion Sickness zuverlässig hergestellt werden kann [9]. Entweder werden dabei Studien in einem Fahrsimulator oder Feldstudien im Realfahrzeug im öffentlichen Verkehr und auf der Teststrecke durchgeführt.

Der große Vorteil von Simulator-Studien gegenüber Studien im Realverkehr ist die Möglichkeit, die Fahrdynamik, den Verkehr und die Wetterbedingungen konstant zu halten [10]. Gerade die Fahrdynamik, die in Realfahrtstudien auf öffentlichen Straßen stark vom Verkehr abhängt, ist für die Auslösung von Motion Sickness entscheidend und sollte möglichst über die Versuchsbedingungen und Probanden konstant gehalten werden. Jedoch können im Simulator die Symptome der Motion Sickness mit denen der Simulator Sickness konfundieren [9]. Studien im Realfahrzeug weisen gegenüber Simulator-Studien eine höhere externe Validität auf [11]. Um ebenfalls eine hohe Reliabilität zu erreichen, muss die Fahrdynamik standardisiert und ausreichend kontrolliert werden. Bei den meisten bisherigen Studien wird

manuell gefahren, wobei der Fahrer teils von Assistenzsystemen wie Automation Cruise Control (ACC) unterstützt wird, z.B. [9, 13]. Die Automation wird in machen Studien auch in einem Wizard-of-Oz Aufbau simuliert, z.B. [14, 15]. Entscheidend für die Reliabilität ist, dass die Fahrer in festgelegter und damit reproduzierbarer Fahrweise trainiert werden [9, 16]. Häufig finden solche Studien auf der Teststrecke statt, z.B. [12, 17-19]. Hier lässt sich das Fahrverhalten u.a. aufgrund der Abwesenheit anderer Verkehrsteilnehmer besser standardisieren als im Realverkehr. Dynamischere Fahrmanöver und entsprechend ein höheres Ausmaß an Motion Sickness sind zudem möglich. Der Vorteil von Studien auf öffentlichen Straßen gegenüber der Teststrecke ist die freie und kostenarme Zugänglichkeit bzw. Verfügbarkeit sowie die Natürlichkeit des Settings. Bisher gibt es im Vergleich zur Teststrecke eher wenige Studien im Realverkehr, die sich mit Motion Sickness beim automatisierten Fahren beschäftigen, z.B. [9, 14, 15, 20]. Je nach Fragestellung werden unterschiedliche Settings empfohlen. Geht es um die Frage der Prävalenz bietet sich ein möglichst natürliches Studiendesign mit freiem Fahren im öffentlichen Verkehr an. Geht es hingegen beispielsweise um den Test einer entwickelten Gegenmaßnahme, ist ein gewisses Maß an Motion Sickness notwendig und es empfiehlt sich ein standardisiertes, möglichst dynamisches Fahrprofil auf der Teststrecke [9]. In einigen Studien auf der Teststrecke wird nur ein bestimmtes Fahrmanöver gewählt, z.B. ein Stop & Go Manöver, bei dem höhere Beschleunigungen nur in Längsrichtung auftreten [18, 21, 22]. Häufig werden außerdem Slalomfahrten mit Beschleunigungswechsel insbesondere in Querrichtung eingesetzt, z.B. [17, 19, 23]. Wenige Studien kombinieren verschiedene Fahrmanöver in der Teststrecke, z.B. [12, 18, 24]. Werden verschiedene Fahrmanöver gefahren, wird meist bei der Auswertung der entstandenen Motion Sickness die gesamte Fahrt und nicht die Veränderung nach den einzelnen Manövern betrachtet.

In der vorliegenden Studie sollen die Vorteile einer Realfahrt im öffentlichen Verkehr mit denen auf der Teststrecke kombiniert werden. Dies bedeutet, dass auf öffentlichen, eher wenig befahrenen Straßen ein definiertes Fahrprofil gefahren wird, um ein möglichst natürliches aber gleichzeitig standardisiertes Setting zu ermöglichen. Soweit bekannt, wurde diese Kombination des Studienaufbaus in Bezug auf Motion Sickness Studien beim automatisierten Fahren so noch nicht durchgeführt. Es soll die Replizierbarkeit des Fahrprofils sowie die Machbarkeit des Studienaufbaus überprüft werden. Außerdem werden verschiedene Fahrmanöver in den Ablauf integriert und im Ausmaß der Motion Sickness verglichen, um Empfehlungen bezüglich geeigneter Fahrmanöver ableiten zu können.

2. Methode

Ablauf und Maße

Die Studie fand im Rahmen des EU-Projekts Hi-Drive (www.hi-drive.eu) statt und bestand aus insgesamt 3 Terminen pro Proband. Die Probanden befanden sich während der Fahrten auf dem Beifahrersitz eines 5er Touring BMWs. Zwischen den Terminen waren mindestens zwei Tage Pause, um Habituations- bzw. Übertragungseffekte zu vermeiden. Zu Beginn des Experiments wurden die Probanden über den Ablauf der Studie und den Datenschutz informiert und unterschrieben den Informed Consent. Die 3 Fahrten unterschieden sich lediglich in der Art der Nebenaufgabe, die während der gesamten Fahrt auf einem Tablet ausgeführt werden musste. Die Reihenfolge der drei Aufgaben wurde randomisiert und ausbalanciert. Die Probanden wurden instruiert, bei allen Aufgaben während der gesamten Fahrt nach unten auf das Tablet und nicht nach oben durch die Frontscheibe zu blicken. Da der Fokus im vorliegenden Bericht nicht auf den Nebenaufgaben, sondern auf dem Fahrprofil liegt, wird auf die Aufgaben an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Vor und nach der Fahrt wurde ein ausführliches Motion Sickness Rating mittels Motion Sickness Assessment Questionnaire [25] erhoben, welcher um die Skala „Head“ mit zwei Items zu Kopfschmerzen und Kopfdruck erweitert wurde. Außerdem wurde die Motion Sickness während der Fahrt mittels Misery Scale (MISC; 0-10) abgefragt [26]. Aus ethischen Gründen wurde ein Abbruchkriterium der Fahrt festgelegt, welches bei einem Wert von 8 auf der MISC-Skala (= mittlere bis starke Übelkeit) lag. Außerdem konnte die Fahrt jederzeit auf Wunsch der Probanden ohne Angabe von Gründen oder nach Einschätzung der Versuchsleitung abgebrochen werden. Die Studie wurde durch den Ethikbeauftragten der WIVW GmbH abgenommen und entsprechende Maßnahmen definiert, um das Wohlergehen der Probanden zu schützen.

Strecke und Fahrmanöver

Die Fahrten fanden auf öffentlichen Straßen in einem wenig befahrenen Industriegebiet in Veitshöchheim sowie auf dem Parkplatz der WIVW GmbH statt. Ohne Abbruch dauerte eine Fahrt ca. 15 Minuten und bestand aus 3 Runden (ca. 5 km). Die Temperatur im Fahrzeug wurde konstant auf 20° Celsius gehalten. Um die Replizierbarkeit der Fahrdynamik über alle Fahrten zu ermöglichen, wurden auf der Strecke Punkte definiert bzw. markiert, an denen bestimmte Geschwindigkeiten erreicht werden mussten, sowie das Beschleunigungsverhalten festgelegt. In der Vorbereitungsphase des Experiments führten die Fahrerinnen mehrere Trainingssitzungen durch, um eine gleichmäßige und reproduzierbare Fahrweise während des gesamten Experiments zu ermöglichen. Insgesamt gab es zwei Fahrerinnen, wobei eine von

beiden 75 % der Fahrten fuhr. Die Fahrmanöver wurden mit dem Sicherheitsbeauftragten der WIVW GmbH besprochen und Maßnahmen abgeleitet, um die Sicherheit aller Insassen zu garantieren. Eine Runde setzte sich aus vier verschiedenen Fahrmanövern und Zwischenabschnitten zwischen den Fahrmanövern zusammen (siehe Bild 1).

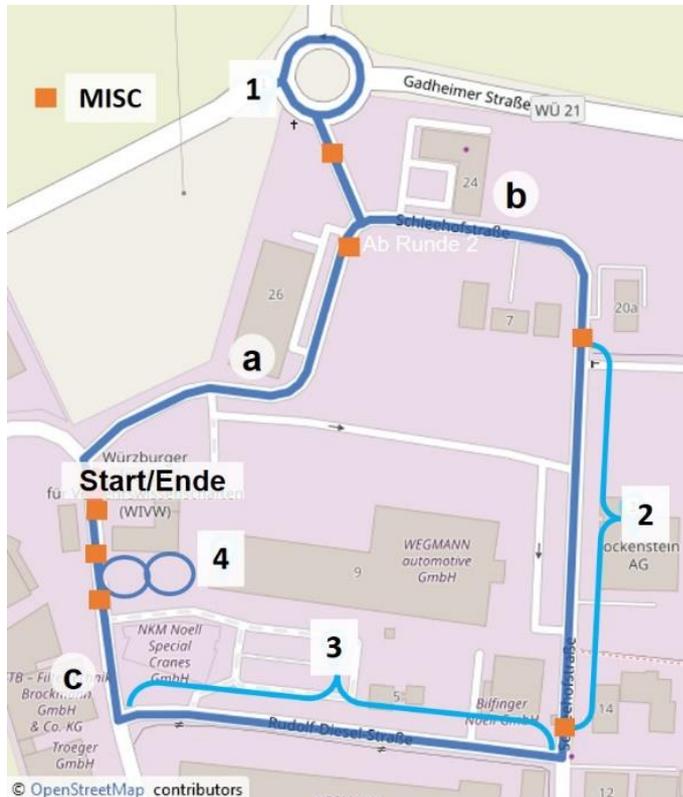


Bild 1: Versuchsstrecke mit verschiedenen Fahrmanövern (1-4) und MISC-Abfragen (Darstellung: [OpenStreetMap](#), Lizenz: [ODbL](#))

Im Folgenden handelt es sich bei den angegebenen Geschwindigkeiten um die angestrebten Zielgeschwindigkeiten auf der Tachoanzeige, welche eine geringfügig höhere Geschwindigkeit als die tatsächliche anzeigt. Der erste Zwischenabschnitt (a), führte zum ersten Fahrmanöver (1), welches einen Kreisverkehr darstellt, der zweimal mit einer konstanten Geschwindigkeit von 25 km/h durchfahren wurde. Anschließend folgte nach Zwischenabschnitt (b) das Stop & Go 1 (2), bei dem vier Mal auf 25 km/h beschleunigt und in den Stand abgebremst wurde. Direkt im Anschluss nach einer Rechtsabbiegung folgte das Stop & Go 2 (3), bei dem zuerst auf 50 km/h beschleunigt, dann auf 30 km/h abgebremst, erneut auf 40 km/h beschleunigt und dann in den Stand abgebremst wurde. Nach einem kurzen Zwischenabschnitt (c) folgte das Manöver Slalom (4), bei dem zweimal ein 8-er Slalom mit einer konstanten Geschwindigkeit von 15 km/h auf dem Parkplatz der WIVW GmbH durchfahren wurde. Anschließend folgte wieder der erste Zwischenabschnitt, womit Runde 2 begann.

Die Motion Sickness wurde an in der Strecke markierten Punkten mündlich immer vor und nach einem Fahrmanöver sowie am Anfang und Ende der Fahrt mithilfe der MISC abgefragt. Die GPS-Daten, Längs- und Querschleunigung wurden während der gesamten Fahrt mit einer SILAB® Android-Anwendung über ein Samsung Galaxy A5 aufgezeichnet. Die Geschwindigkeit wurde ebenfalls mit SILAB® über ein Tablet, auf dem außerdem die Nebenaufgaben liefen, aufgezeichnet.

Stichprobe

An der Studie nahmen $N = 20$ Probanden ($n = 11$ weiblich, $n = 9$ männlich) teil, wodurch sich insgesamt $N = 60$ Fahrten ergaben. Das mittlere Alter lag bei $M = 36.25$ Jahren ($SD = 15.33$, $Min = 20$, $Max = 61$). Die Probanden wurden mittels einer Online-Vorbefragung bezüglich der Motion Sickness Anfälligkeit ausgewählt. Hierfür wurde neben spezifischen Fragen zur Anfälligkeit als Beifahrer, wenn Nebentätigkeiten ausgeführt werden, der Motion Sickness Susceptibility Questionnaire Short (MSSQ) verwendet [27]. Für die Studie wurden mittel bis stark anfällige Personen eingeladen (mittlerer MSSQ Raw = 30.33, $SD = 10.19$).

Datenanalyse

Zur Validierung des Fahrprofils wurden als Parameter die Geschwindigkeit sowie die Quer- und Längsbeschleunigung herangezogen. Dabei wurde ein deskriptiver Vergleich der Variablen in den einzelnen oben dargestellten Fahrmanövern, die mittels GPS-Positionierung identifiziert wurden, durchgeführt. Für alle Fahrmanöver können die Geschwindigkeiten verglichen werden. Ebenso sind die Längsbeschleunigung bei den beiden Stop & Go-Manövern sowie die Querschleunigung für den Kreisverkehr sowie den Slalom nutzbar. Im Ergebnisteil werden die Untersuchungen exemplarisch dargestellt. Als Bewertungskriterien werden zum größten Teil der Median sowie die 5% und 95%-Perzentile genutzt, um zu zeigen, dass sich die Dynamik von einem Großteil der Manöver in einem engen Rahmen bewegen. Für die Kontrolle, ob mit dem vorliegenden Fahrprofil zuverlässig Motion Sickness erzeugt werden konnte, werden deskriptive Maße (M , SD) der MISC-Bewertung und des MSAQs am Ende der Fahrt berechnet. Für eine Darstellung der Entwicklung der Motion Sickness über die Fahrt werden die über alle Fahrten gemittelten MISC-Werte für die Befragungszeitpunkte aller 3 Runden dargestellt. Bei den abgebrochenen Fahrten wird der letzte MISC-Wert vor Abbruch weitergeschrieben. Es handelt sich dabei um eine konservative Annahme, denn es ist davon auszugehen, dass, wenn die Fahrt nicht abgebrochen worden wäre, die Motion Sickness weiter angestiegen wäre. Um die Fahrmanöver bezüglich des Ausmaßes des Motion Sickness Anstiegs vergleichen zu können, wird pro Runde die Differenz der MISC-Bewertung jeweils

zwischen vor und nach dem Manöver berechnet und pro Proband über alle Runden für das jeweilige Manöver gemittelt. Da es sich bei der MISC um ein ordinalskaliertes Maß handelt, werden die Unterschiede der MISC-Differenzen zwischen den Fahrmanövern mittels Friedman Test inferenzstatistisch abgesichert. Außerdem werden die Häufigkeiten der Abbrüche pro Fahrmanöver betrachtet.

3. Ergebnisse

Fahrprofil

In Bild 2 ist der Geschwindigkeitsverlauf von allen von den Fahrern absolvierten Runden in Abhängigkeit der gefahrenen Strecke dargestellt. Diese umfasst aufgrund von Abbrüchen ca. 150 Runden. Der Median ist als Linienverlauf dargestellt sowie der Bereich mit den 5% und 95%-Perzentilen als Grenze. Ebenfalls eingezeichnet sind die einzelnen Fahrmanöver, der Kreisverkehr mit konstanter Geschwindigkeit, die beiden Stop & Go-Manöver sowie zum Abschluss der Slalom, ebenfalls mit relativ konstanter Geschwindigkeit.

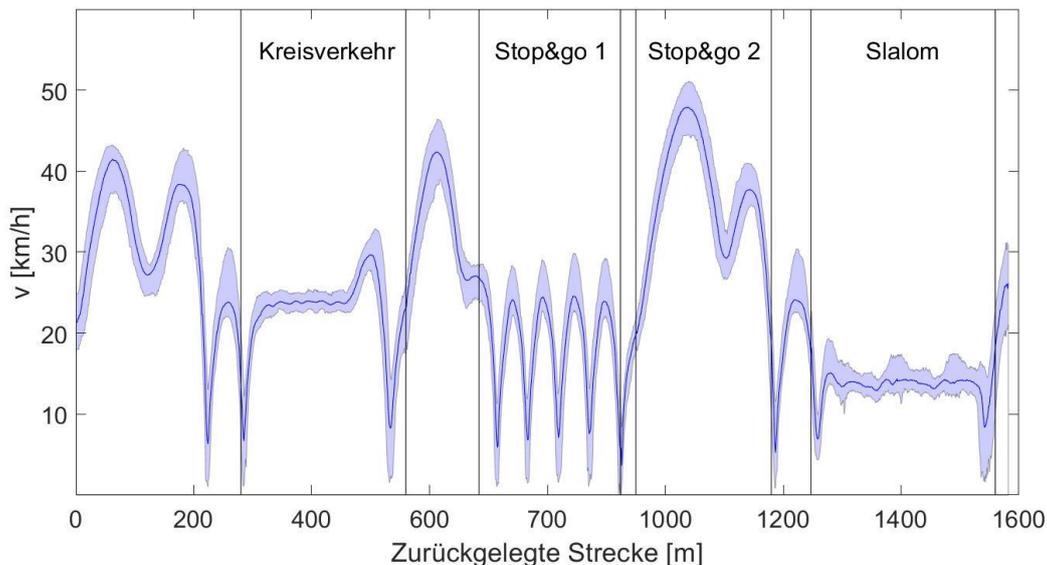


Bild 2: Streckenabhängige Geschwindigkeit (Median/5%/95%-Perzentile) über eine Runde

Auf diese Weise wird die Ähnlichkeit der gefahrenen Manöver grafisch dargestellt. Der Perzentilbereich ist meist sehr schmal und weist nur eine geringe Höhe von wenigen km/h, selbst bei den sehr dynamischen Fahrmanövern, auf. Die absoluten Geschwindigkeiten in den verschiedenen Fahrmanövern entsprechen denen der Zielgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung der oben bereits erwähnten Abweichung von der Tachoanzeige.

Neben der Geschwindigkeit wurden auch die Parameter Quer- und Längsbeschleunigung betrachtet. Im Folgenden wird exemplarisch für alle Manöver die Längsbeschleunigung für das erste Stop & Go Manöver (Bild 3) genauer untersucht.

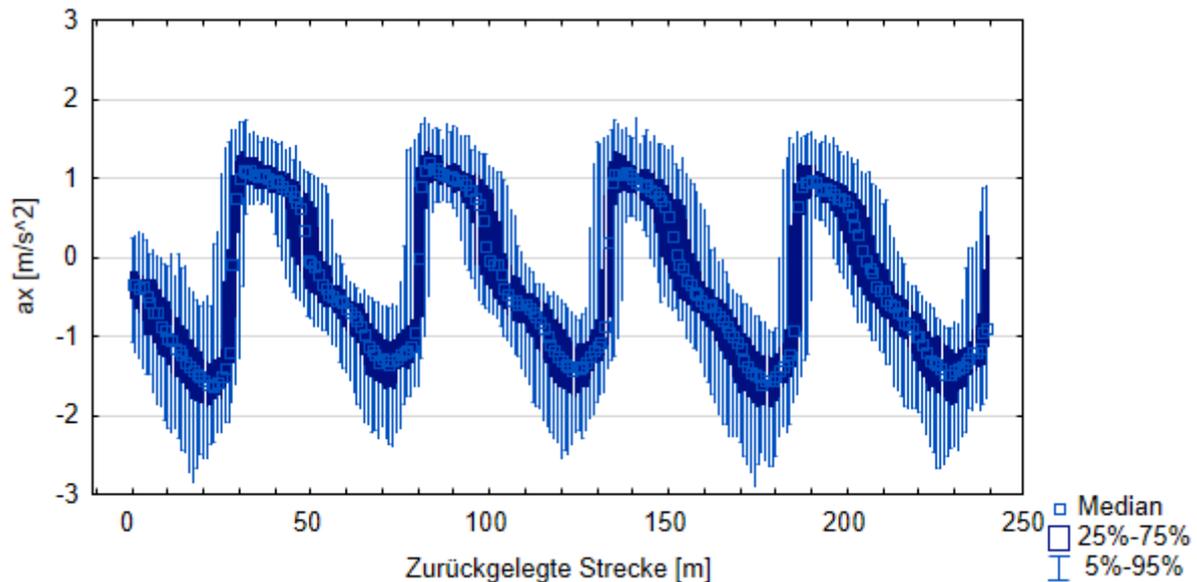


Bild 3: Streckenabhängiger Verlauf der Längsbeschleunigung – Stop & Go 1

Da die Vorgabe war, die Beschleunigung möglichst gleichmäßig durchzuführen, werden für die Bewertung, zusätzlich zur Verlaufsanalyse, jeweils die vier lokalen Maxima und Minima pro Durchfahrt und darüber Median, Quartile und 5% und 95%-Perzentile berechnet, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Parameter zur Längsbeschleunigung (Einheit: m/s^2) des Manövers Stop & Go 1

	5%-Perz.	Unteres Quartil	Median	Oberes Quartil	95%-Perz.
1. lok. Maxima	1.09	1.24	1.35	1.54	2.41
2. lok. Maxima	1.08	1.30	1.40	1.58	2.51
3. lok. Maxima	0.98	1.19	1.35	1.51	2.31
4. lok. Minima	0.98	1.16	1.35	1.51	2.42
1. lok. Minima	-2.77	-1.97	-1.70	-1.50	-1.29
2. lok. Minima	-2.74	-2.17	-1.81	-1.61	-1.38
3. lok. Minima	-3.06	-2.23	-1.98	-1.86	-1.62
4. lok. Minima	-2.90	-2.07	-1.88	-1.71	-1.52

Die so ermittelten vier Mediane für die Beschleunigung befinden sich alle zwischen 1.35 und 1.4 m/s^2 , weisen somit nur eine Abweichung von weniger als 0.05 m/s^2 auf. Ähnliches gilt auch für das untere sowie das obere Quartil. Bei dem 5%-Perzentil und dem 95%-Perzentil zeigen sich zwar schon größere Abweichungen, doch ist hierbei zu bedenken, dass schon kurzfristige Abweichungen zu erheblichen Schwankungen von Maxima und Minima führen können. Die Betrachtung der Minima zeigt ein ähnliches Bild, wobei die Streuung etwas höher ist als bei der Beschleunigung.

Die anderen Manöver wurden analog untersucht und zeigten ähnlich konsistente Ergebnisse. Zur Veranschaulichung wird exemplarisch für den Slalom der Verlauf der Querbewegung grafisch dargestellt (Bild 4).

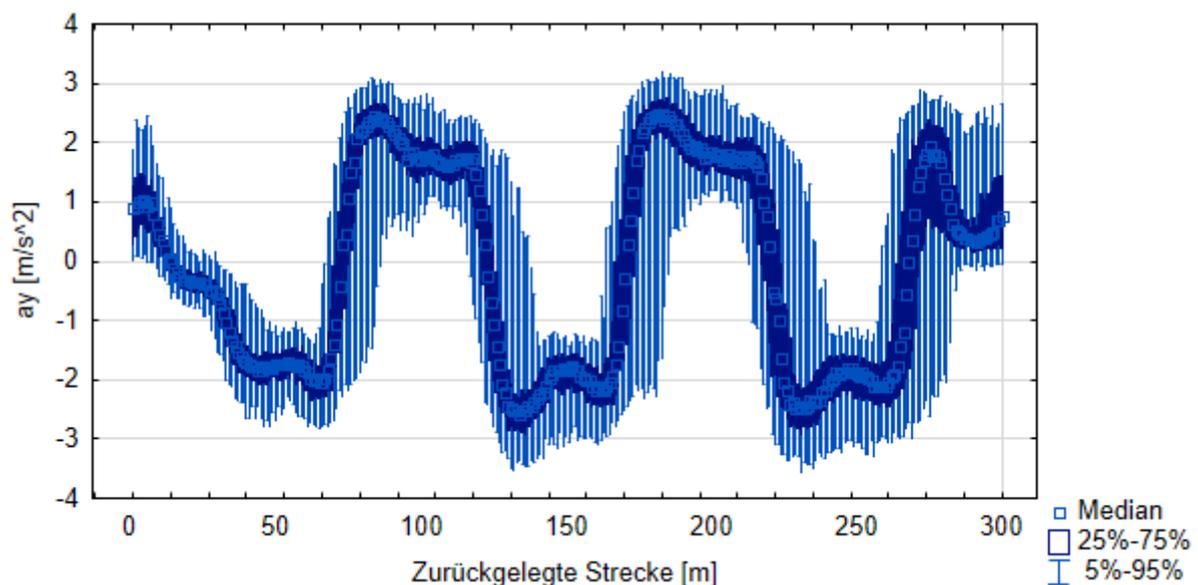


Bild 4: Streckenabhängiger Verlauf der Querbewegung – Slalom

Motion Sickness

In Tabelle 2 sind die mittleren Motion Sickness Ratings nach der Fahrt aufgeführt. Im Mittel wurde über alle Fahrten eine mittlere bis starke Motion Sickness erzeugt.

Tabelle 2: Motion Sickness Ratings nach der Fahrt

Skala	M	SD	Min	Max
MISC	5.57	2.30	0	9
MSAQ*	39.88	17.61	11.11	84.31

*mögliches Min = 11.11, mögliches Max = 100

In Bild 5 ist der Verlauf der MISC-Bewertungen über die Fahrt gemittelt für alle Probanden dargestellt. Auf der x-Achse sind die jeweiligen Zeitpunkte der MISC-Abfragen (siehe Bild 1) abgetragen. Es zeigt sich im Mittel ein kontinuierlicher Anstieg der erlebten Motion Sickness.

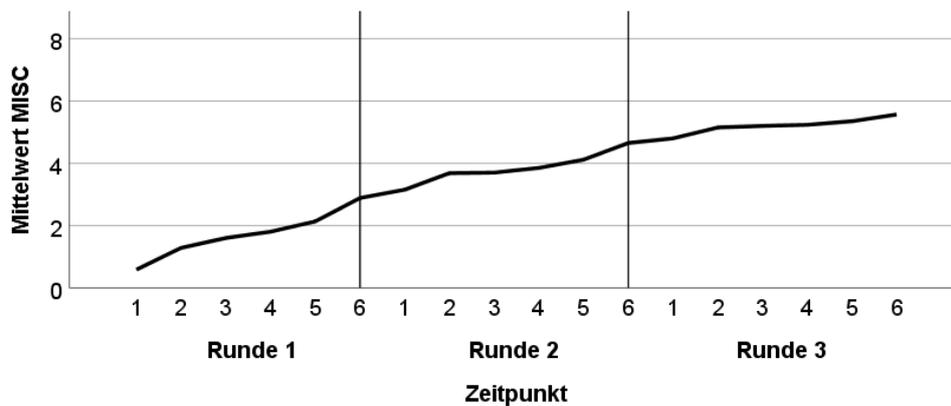


Bild 5: Verlauf der gemittelten Motion Sickness über die Fahrt (MISC: 0 = keine Probleme, 8 = mittel bis starke Übelkeit)

Die Manöver unterscheiden sich signifikant im Ausmaß des Motion Sickness Anstiegs ($\chi^2(3) = 18.524, p < .001, n = 20$). Die Post-hoc-Tests (Dunn-Bonferroni) zeigen, dass sich die Anstiege der Motion Sickness zwischen Kreisverkehr und Stop & Go 1 ($z = 1.125, p_{\text{korr}} = .035, r = .25$), zwischen Slalom und Stop & Go 1 ($z = -1.450, p_{\text{korr}} = .002, r = .32$) sowie zwischen Slalom und Stop & Go 2 ($z = -1.225; p_{\text{korr}} = .016; r = .27$) signifikant unterscheiden. Damit ergibt sich, dass die beiden querdynamischen Manöver Kreisverkehr und Slalom im Mittel zu einem stärkeren Anstieg der Motion Sickness führen (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Deskriptiva der MISC-Differenzen pro Manöver

	Kreisverkehr	Stop&Go1	Stop&Go2	Slalom
M	0.62	0.16	0.28	0.65
SD	0.57	0.30	0.23	0.60

Tabelle 4: Anzahl der Abbrüche pro Runde und Manöver

Runde	Kreisverkehr	Stop&Go1	Stop&Go2	Slalom	Stück n. Slalom	Summe
1	0	0	2	0	0	2
2	2	1	2	2	3	10
3	2	0	1	4	1	8
Summe	4	1	5	6	4	20

Tabelle 4 zeigt die Anzahl an Abbrüche pro Runde und Fahrmanöver bzw. Abschnitt, nach dem der Abbruch stattfand. Insgesamt wurde ein Drittel der Fahrten (N = 20) abgebrochen, da entweder das Abbruchkriterium erreicht wurde, oder der Abbruch auf Wunsch der Teilnehmenden bzw. nach Einschätzung der Versuchsleitung geschah.

4. Diskussion und Fazit

Ziel der vorgestellten Studie war es u.a. zu prüfen, wie Motion Sickness im Fahrzeug auf öffentlichen Straßen zuverlässig, replizierbar und mit überschaubarem Aufwand hergestellt werden kann. Dies ist nötig, wenn man beispielsweise die Wirksamkeit möglicher Gegenmaßnahmen oder die Auswirkung unterschiedlicher MMI-Lösungen auf die Entstehung von Motion Sickness untersuchen möchte. Das gewählte Untersuchungsdesign kombiniert eine Abfolge von Fahrmanövern mit hoher Längs- oder Querdynamik mit visueller Ablenkung durch Nebenaufgaben. Insgesamt konnte so im Mittel ein mittleres bis hohes Motion Sickness Level innerhalb von 15 Minuten erzeugt werden, was für die Anwendbarkeit des gewählten Designs spricht. Bei einem Drittel der Fahrten waren die Symptome so stark ausgeprägt, dass aus ethischen Gründen die Fahrt abgebrochen werden musste.

Die Auswertung der Geschwindigkeit und der gemessenen Beschleunigung zeigt, dass es gelungen ist, mit minimalem technischem Aufwand über die Fahrten ein vergleichbares Fahrprofil herzustellen. Dies war möglich, da für die Versuchsfahrten öffentliche, jedoch sehr verkehrsarme Straßen, gewählt wurden, so dass der Einfluss möglicher Störgrößen durch umgebenden Verkehr deutlich reduziert werden konnte. Um das Fahrprofil festzulegen, wurde eine Abfolge von Geschwindigkeiten definiert, die jeweils an festgelegten Punkten der Strecke erreicht werden sollten. Es lässt sich kritisch diskutieren, ab welchem Grenzwert die Abweichungen vertretbar sind und muss für jedes Studiensetting und Forschungsfrage individuell festgelegt werden. In dieser Studie wurde ein deskriptiver Ansatz gewählt, um potentielle Abweichungen festzustellen. Die Generalisierbarkeit dieses Studienergebnisses auf öffentliche Straßen im Allgemeinen ist nicht möglich, da in dieser Studie ein spezifisches Setting (verkehrsarme Straßen im Industriegebiet) getestet wurde.

Weiterhin wurden die einzelnen Fahrmanöver bezüglich der erzeugten Motion Sickness verglichen. Am häufigsten wurde nach dem Slalom, also wechselnder Querschleunigung, am zweithäufigsten nach Stop & Go 2 abgebrochen. Hier ist jedoch zu beachten, dass auch nach Einschätzung der Versuchsleitung die Fahrt abgebrochen werden konnte, wenn die MISC-Bewertung vor dem Slalom, sprich nach Stop & Go 2, schon kurz vor dem Abbruchkriterium lag, wurde der Slalom zum Schutz der Teilnehmenden nicht mehr durchgeführt, weshalb dieses Ergebnis nur eingeschränkt interpretierbar ist. Um die

verschiedenen Fahrmanöver im Anstieg der erzeugten Motion Sickness vergleichen zu können, wurden außerdem die Differenzen des Motion Sickness Levels zwischen vor und nach einem Manöver betrachtet. Bei den Manövern mit lateraler Beschleunigung (Slalom, Kreisverkehr) stieg die Motion Sickness signifikant stärker an als bei den longitudinalen Manövern (Stop & Go 1 und 2). Zwischen wechselnder und konstanter Querbeschleunigung gab es keinen Unterschied im Anstieg, jedoch wurde nach wechselnder Querbeschleunigung häufiger abgebrochen. Die Ergebnisse stimmen nicht mit den Befunden der Studie von Hartmann und Kollegen überein, die Längs- und Querbeschleunigungen hinsichtlich des Ausmaßes der Motion Sickness verglichen: Hier erzeugten longitudinalen Beschleunigungen stärkere Motion Sickness Level im Vergleich zu lateralen Beschleunigungen [28].

Im Rahmen des EU-Projekts Hi-Drive (<https://www.hi-drive.eu/>) sollen individuelle Unterschiede in der Motion Sickness Anfälligkeit zwischen lateralen und longitudinalen Beschleunigungen weiter untersucht werden, wodurch sich mögliche Inkonsistenzen zwischen Studienergebnissen auflösen könnten. Bei der Interpretation der vorliegenden Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die Manöver nicht in randomisierter Reihenfolge und nicht isoliert, sondern hintereinander in derselben Reihenfolge betrachtet wurden, d.h. Übertragungseffekte der einzelnen Manöver sind denkbar. Da allerdings mehrere Runden nacheinander gefahren wurden, ergibt sich über die gesamte Fahrtdauer ein Wechsel zwischen längs- und querdynamischen Manövern. Weiterhin handelte es sich nicht um dasselbe Ausmaß der Beschleunigung in Längs- und Querrichtung. Dies könnte die Ergebnisse ebenfalls beeinflusst haben und muss in weiteren Studien überprüft werden.

Auf Basis der Studienergebnisse können für die Erzeugung von Motion Sickness im Rahmen einer Realfahrtstudie folgende Empfehlungen gegeben werden:

- Eine Durchführung auf öffentlichen Straßen ist möglich, es sind aber Straßen mit geringem Verkehrsaufkommen zu bevorzugen.
- Durch die Kombination einfacher dynamischer Manöver wie Slalom, Kreisverkehr und Stop & Go kann innerhalb kurzer Zeit Motion Sickness erzeugt werden.
- Diese dynamischen Fahrmanöver sollten mit einer visuellen Nebentätigkeit kombiniert werden.
- Manöver mit hoher Querdynamik (Slalom, Kreisverkehr) scheinen verstärkt Motion Sickness auszulösen. Hier ist aber weitere Forschung, auch zu interindividuellen Unterschieden, nötig.

Zusammenfassend hat die vorliegende Studie gezeigt, dass das Setting eines standardisierten dynamischen Fahrprofils auf öffentlichen Straßen zur Herstellung von Motion Sickness

geeignet ist und empfohlen werden kann. Auf Basis der Studienergebnisse kann weiterhin abgeleitet werden, im öffentlichen Verkehr Fahrmanöver mit Quer- statt Längsbeschleunigung zu wählen, wenn ein höheres Maß an Motion Sickness erforderlich ist. Dieses Ergebnis sollte jedoch aufgrund von Inkonsistenzen mit anderen Studienergebnissen weiter überprüft werden.

5. Danksagung

Dieses Projekt wurde mit Mitteln aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm Horizont 2020 der Europäischen Union unter der Fördervereinbarung Nr. 101006664 finanziert. Die alleinige Verantwortung für diese Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Die Autoren möchten sich bei allen Partnern von Hi-Drive für ihre Zusammenarbeit sowie bei Linda Haas für die zuverlässige Versuchsleitung bedanken.

6. Literatur

- [1] Diels, C. u. Bos, J.E.: Self-driving carsickness. *Applied ergonomics* 53 (2016) S. 374-382
- [2] Diels, C., Bos, J.E., Hottelart, K. u. Reilhac, P.: Motion sickness in automated vehicles: the elephant in the room. *Road Vehicle Automation* 3 (2016) S. 121-129
- [3] Smyth, J., Jennings, P. u. Birrell S.: Are You Sitting Comfortably? How Current Self-driving Car Concepts Overlook Motion Sickness, and the Impact It Has on Comfort and Productivity. *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. 2019, S. 387-399
- [4] Tyler, D.B. u. Bard, P.: Motion sickness. *Physiological reviews* 29 (1949) 4 S. 311-369
- [5] Claremont, C.A.: The psychology of seasickness. *Psyche* 11 (1931) S. 86-90
- [6] Golding, J.F.: Motion sickness. *Handbook of clinical neurology* 137 (2016) S. 371-390
- [7] Graybiel, A., Wood, C.D., Miller, E.F. u. Cramer, D.B.: Diagnostic criteria for grading the severity of acute motion sickness. *Aerospace medicine* 39 (1968) 5 S. 453-455
- [8] Reason J.T. u. Brand, J.J.: *Motion sickness*. London: Academic Press 1975
- [9] Mühlbacher, D., Tomzig, M., Reinmüller, K. u. Rittger, L.: Methodological Considerations Concerning Motion Sickness Investigations during Automated Driving. *Information* 11 (2020) 5 S. 265-287
- [10] Kaptein, N.A., Theeuwes, J. u. Van Der Horst, R.: Driving simulator validity: Some considerations. *Transportation research record* 1550 (1996) 1 S. 30-36
- [11] Fisher, D.L., Caird, J.K., Rizzo, M. u. Lee J.D.: *Handbook of driving simulation for engineering, medicine and psychology: An overview*. Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology, 2011
- [12] Talsma, T.M., Hassanain, O., Happee, R. u. de Winkel K.N.: Validation of a moving base driving simulator for motion sickness research. *Applied ergonomics* 106 (2023) S. 103897
- [13] Brietzke, A., Pham Xuan, R., Dettmann, A. u. Bullinger, A.C.: Concepts for Vestibular and Visual Stimulation to Mitigate Carsickness in Stop-and-Go-Driving. *IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. 2021, S. 3909-3916
- [14] Karjanto, J., Yusof, N.M., Hassan, M.Z., Terken, J., Delbressine, F. u. Rauterberg, M.: An on-road study in mitigating motion sickness when reading in automated driving. *Journal of Hunan University Natural Sciences* 48 (2021) 3

- [15] Yusof, N.M., Karjanto, J., Terken, J., Delbressine, F. u. Rauterberg, G.: Gaining Situation Awareness through a Vibrotactile Display to Mitigate Motion Sickness in Fully-Automated Driving Cars. *International Journal of Automotive & Mechanical Engineering* 17 (2020)
- [16] Bengler, K., Omozik, K. u. Müller, A.I.: The Renaissance of Wizard of Oz (WoOz)–Using the WoOz methodology to prototype automated vehicles. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe*. 2020, S. 63-72
- [17] Hainich, R., Drewitz, U., Ihme, K., Lauer mann, J., Niedling, M. u. Oehl, M.: Evaluation of a Human–Machine Interface for Motion Sickness Mitigation Utilizing Anticipatory Ambient Light Cues in a Realistic Automated Driving Setting. *Information* 12 (2021) 4 S. 176
- [18] Bohrmann, D., Bruder, A. u. Bengler, K.: Effects of Dynamic Visual Stimuli on the Development of Carsickness in Real Driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 23 (2022) 5 S. 4833-4842
- [19] Irmak, T., Pool, D.M. u. Happee, R.: Objective and subjective responses to motion sickness: the group and the individual. *Experimental brain research* 239 (2021) 2 S. 515-531
- [20] Schmidt, E. , Emmermann, B., Venrooij, J. u. Reinprecht, K.: Occurrence of motion sickness during highway and inner-city drives. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe*. 2019
- [21] Brietzke, A., Pham Xuan, R., Dettmann, A. u. Bullinger, A.C.: Influence of dynamic stimulation, visual perception and individual susceptibility to car sickness during controlled stop-and-go driving. *Forschung im Ingenieurwesen* 85 (2021) 1
- [22] Pham Xuan, R., Xiong, Y., Brietzke, A. u. Marker, S.: Thermal infrared imaging based facial temperature in comparison to ear temperature during a real-driving scenario. *Journal of Thermal Biology* 96 (2021) S. 102806
- [23] Kuiper, O.X., Bos, J.E. u. Diels, C.: Looking forward: In-vehicle auxiliary display positioning affects carsickness. *Applied ergonomics* 68 (2018) S. 169-175
- [24] Schartmüller C. u. Riener, A.: Sick of scents: Investigating non-invasive olfactory motion sickness mitigation in automated driving. *12th International conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications*. 2020, S. 30-39
- [25] Gianaros, P.J., Muth, E.R., Mordkoff, J.T., Levine, M.E. u. Stern, R.M.: A questionnaire for the assessment of the multiple dimensions of motion sickness. *Aviation, space, and environmental medicine* 72 (2001) 2, S. 115-9
- [26] Bos, J.E., MacKinnon, S.N. u. Patterson, A.: Motion sickness symptoms in a ship motion simulator: effects of inside, outside, and no view. *Aviation, space, and environmental medicine* 76 (2005) 12, S. 1111-1118
- [27] Golding, J.F.: Motion sickness susceptibility questionnaire revised and its relationship to other forms of sickness. *Brain research bulletin* 47 (1998) 5 S. 507-516
- [28] Hartmann, A., Cyberski, C., Schönfeld, U., Krzok, W. u. Müller, S.: Effect of Horizontal Acceleration and Seat Orientation on Motion Sickness in Passenger Cars. *AVEC'22*, 2022