

Abschlussbericht

**AFiM: Automatisiertes Fahren im Mischverkehr -
Untersuchung der Sicherheit und Leistungsfähigkeit des
urbanen Mischverkehrs unter Berücksichtigung des
inhärenten Risikos**

Dokumenten-Information

Projekt:	Automatisiertes Fahren im Mischverkehr - Untersuchung der Sicherheit und Leistungsfähigkeit des urbanen Mischverkehrs unter Berücksichtigung des inhärenten Risikos				
Projektkurztitel:	AFiM				
Dokumententitel:	Abschlussbericht				
Dokument ID:	AFiM_Abschlussbericht				
Version:	1.2	Datum:	12.10.21	Seitenanzahl:	230

Autoren:

Institut	Autor
TUBS-IVS	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich (ORCID: 0000-0003-4290-3614) Anysia Mayerhofer Sefa Yilmaz-Niewerth (ORCID: 0000-0001-9241-4742)
TUBS-IV	Univ.-Prof. Mark Vollrath (ORCID: 0000-0001-8508-8934) Dr. Vanessa Stange (ORCID: 0000-0002-3081-3163)
TUBS-IfR	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Maurer (ORCID: 0000-0002-5357-9701) Susanne Ernst Markus Steimle (ORCID: 0000-0001-8913-6980) Nayel Salem (ORCID: 0000-0003-4909-9403)
LUH-IRZ	Chris Timmermann (ORCID: 0000-0002-0432-5086) Nico Diekmann (ORCID: 0000-0002-7324-3527)

Inhalt

Dokumenten-Information	2
Inhalt.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	6
Tabellenverzeichnis.....	13
1 Einleitung	15
1.1 Hintergrund und Motivation	15
1.2 Zielsetzung und Arbeitsmethodik	16
2 Stand von Wissenschaft und Technik.....	18
2.1 Interaktionen zwischen menschlichen Verkehrsteilnehmern und automatisierten Fahrzeugen.....	18
2.2 Erlebtes Risiko im Straßenverkehr.....	21
2.3 Auslegungen automatisierter Fahrfunktionen für den städtischen Verkehr ...	23
2.4 Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf städtische Verkehrsqualität ...	24
2.5 Das Konzept des objektiven Risikos im städtischen Verkehr.....	25
3 Neuheitsgrad, Fortschritt gegenüber dem Stand der Wissenschaft und Technik....	26
3.1 Gestaltung automatisierter Fahrfunktionen im städtischen Bereich unter Berücksichtigung des erlebten Risikos (TUBS).....	26
3.2 Erweiterung von Simulationsmodellen um Interaktionen mit Fußgängern und Radfahrern mit automatisierten Fahrzeugen (TUBS & LUH).....	27
3.3 Modellierung einer großflächigen Verkehrsflusssimulation mit automatisiertem Mischverkehr (TUBS).....	28
4 Methodische Grundlagen für die Untersuchungen.....	30
4.1 Auswahl relevanter Szenarien und Interaktionen (TUBS).....	30
4.1.1 Gerade Hauptstraße.....	31
4.1.2 Einmündung.....	32
4.1.3 Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage.....	33
4.1.4 Zusammenfassung.....	33
4.2 Umsetzung von ausgewählten Szenarien – Fahrfunktion, Fahrsimulation und Verkehrssimulation (TUBS & LUH)	34
4.2.1 Fahrfunktion und Verkehrssimulation (TUBS & LUH)	34
4.2.2 Umsetzung im Fahr Simulator – Szenarien (TUBS)	35
4.2.3 Variation des Risikos in der Fahrfunktion (TUBS).....	40
4.3 Entwicklung einer Bewertungsmethodik für erlebtes Risiko (TUBS)	53
4.3.1 Versuchsplan.....	54
4.3.2 Versuchspersonen.....	55
4.3.3 Material und Geräte.....	55
4.3.4 Durchführung.....	57
4.3.5 Ergebnisse.....	58
4.3.6 Zusammenfassung.....	63
5 Ergebnisse der empirischen Untersuchungen	65
5.1 Studie 1: Erlebtes Risiko von Mitfahrern auf einer geraden Hauptstraße (TUBS)	65
5.1.1 Methodik	65
5.1.2 Ergebnisse: Fragebogendaten	70
5.1.3 Ergebnisse: Fahrdaten	92
5.1.4 Diskussion	95
5.1.5 Zusammenfassung Studie 1: Anpassung der Fahrfunktion bei Anwesenheit einer Fußgängerin	98
5.1.6 Methodische Bewertung	99
5.2 Studie 2: Erlebtes Risiko an einer Einmündung (TUBS)	101

5.2.1	Methodik	101
5.2.2	Stichprobe	101
5.2.3	Ergebnisse	102
5.2.4	Diskussion	111
5.2.5	Zusammenfassung Studie 2: Anpassung der automatisierten Fahrfunktion an einer Einmündung	114
5.2.6	Methodische Bewertung	115
5.3	Studie 3: Erlebtes Risiko im VIL (TUBS)	117
5.3.1	Methodik	117
5.3.2	Ergebnisse: Gerade Hauptstraße	137
5.3.3	Ergebnisse: Einmündung	140
5.3.4	Diskussion	145
5.3.5	Methodische Bewertung	148
5.4	Analyse verschiedener Belastungssituationen (TUBS)	148
5.4.1	Simulationsstudie	148
5.5	Auswirkungen von automatisierten Fahrzeugen auf die Systemleistungsfähigkeit (TUBS)	153
5.5.1	Methodik	153
5.5.2	Ergebnisse	159
5.5.3	Diskussion	161
5.6	Risikomaß (LUH)	162
5.6.1	Entwicklung eines mathematischen Modells für ein Risikomaß	162
5.6.2	Plausibilitätsüberprüfung	165
5.6.3	Risikoanalyse der SUMO-Großraumsimulation der List	167
5.6.4	Zusammenfassung	171
6	Zusammenfassung und Ausblick	172
6.1	Erlebtes Risiko von Mitfahrern automatisierter Fahrzeuge und schwächeren Verkehrsteilnehmern (TUBS)	172
6.2	Systemleistungsfähigkeit im Mischverkehr mit automatisierten Fahrzeugen und relatives objektives Risiko (TUBS & LUH)	173
7	Verwertung der Forschungsergebnisse	176
7.1	Wissenschaftliche Verwertung	176
7.2	Wirtschaftliche Verwertung	176
8	Anhang A	177
8.1	Probandenstudien: Instruktionen	177
8.1.1	AP 4400: Instruktion Befragungsmethodik Mitfahrer	177
8.1.2	AP 4400: Instruktion Befragungsmethodik Radfahrer	178
8.1.3	AP 6200 / 7300: Instruktion Probandenstudie 1	179
8.1.4	AP 6200 / 7300: Instruktion Studienteil 1 (Probandenstudie 1)	180
8.1.5	AP 6200 / 7300: Instruktion Studienteil 2 (Probandenstudie 1)	181
8.1.6	AP 6200 / 7300: Instruktion Studienteil 2 (Probandenstudie 1)	182
8.1.7	AP 6200 / 7300: Instruktion aus Mitfahrersicht	183
8.1.8	AP 6200 / 7300: Instruktion aus Radfahrer-/ Fußgängersicht	184
8.1.9	AP 7200: Instruktionen Validierungsstudie (Einmündung)	185
8.1.10	AP 7200: Instruktionen Validierungsstudie (Gerade Hauptstraße)	187
8.1.11	AP 7200: Hygienekonzept	188
8.1.12	AP 7200: Sicherheitskonzept	190
8.2	Probandenstudien: Fragebögen	191
8.2.1	AP 4400: Soziodemographischer Fragebogen (Mitfahrer)	191
8.2.2	AP 4400: Soziodemographischer Fragebogen (Fahrrad)	194
8.2.3	AP 4400: Fragebogen nach jeder Einzelfahrt (Mitfahrer)	196
8.2.4	AP 4400: Fragebogen nach jeder Einzelfahrt (Fahrrad)	199
8.2.5	AP 6200 / 7300: Studie 1 Soziodemographischer Fragebogen	202
8.2.6	AP 6200 / 7300: Studie 1 Fragebogen nach jeder Einzelfahrt	205
8.2.7	AP 6200 / 7300: Studie 1 Abschlussfragebogen	208

8.2.8	AP 6200 / 7300 Studie 2 Soziodemographischer Fragebogen	211
8.2.9	AP 6200 / 7300 Studie 2 Befragung (Mitfahrer / Radfahrer / Fußgänger) nach jeder Einzelfahrt.....	214
8.2.10	AP 7200: Soziodemographischer Fragebogen	215
8.2.11	AP 7200: Fragebogen nach jeder Einzelfahrt (Einmündung).....	219
8.2.12	AP 7200: Fragebogen nach jeder Einzelfahrt (Einmündung).....	221
9	Literatur.....	223

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Links: Satellitenbild eines Abschnitts des Hagenrings mit zwei Fahrstreifen in jede Fahrtrichtung in Braunschweig (Quelle: Google Maps). Rechts: Satellitenbild eines Abschnitts des Bültenwegs mit einem Fahrstreifen in jede Fahrtrichtung in Braunschweig (Quelle: Google Maps).....	32
Abbildung 2: Satellitenbild der Einmündung Schunterstraße x Hagenring in Braunschweig (Quelle: Google Maps).....	33
Abbildung 3: Graphische Darstellung desselben Szenarios in VTD (links) und MODIS (rechts)	34
Abbildung 4: Statischer Fahrzeugsimulator des Lehrstuhls für Ingenieur- und Verkehrspsychologie der TU Braunschweig (Foto: Vanessa Stange).....	36
Abbildung 5: Frontansicht mit sechs Bildschirmen und Fahrrad (Foto: Vanessa Stange).....	36
Abbildung 6: Hinterradaufhängung mit Walze (Foto: Vanessa Stange).....	37
Abbildung 7: Implementiertes Fahrscenario aus Mitfahrersicht im automatisierten Fahrzeug.	38
Abbildung 8: Innensicht eines Mitfahrers im automatisierten Fahrzeug auf das Einmündungsszenario.	38
Abbildung 9: Einmündung aus der Innensicht im automatisierten Fahrzeug. Links: Heranfahrt an die Einmündung im automatisierten Fahrzeug. Rechts: Ein Radfahrer bzw. ein Fußgänger kreuzt die Einmündung.	39
Abbildung 10: Einmündung aus der Außensicht eines schwächeren Verkehrsteilnehmers. Links: Heranfahrt an die Einmündung. Rechts: Das automatisierte Fahrzeug hält an der Haltelinie, um dem schwächeren Verkehrsteilnehmer Vorfahrt zu gewähren.	39
Abbildung 11: Aufbau der Softwaremodule für die Fahrfunktion (rot) und der relevanten Eingangsgrößen eines automatisierten Fahrzeugs am Institut für Regelungstechnik.	40
Abbildung 12: Errechnete Zielpose und Referenzpfad aus der Verhaltensentscheidung mit dem berechneten Manöver „Fahrstreifen folgen“	41
Abbildung 13: Implementierung eines lateralen Versatzes zur Fahrstreifenmitte für das erste Szenario der Probandenstudie.	42
Abbildung 14: Errechnete Zielpose vor und nach der Kommunikation des Haltewunsches. Oben führt das Fahrzeug das Manöver „Fahrstreifen folgen“ aus, unten wird auf das Manöver „Halten“ gewechselt und die Zielpose auf den vordefinierten Haltepunkt gesetzt.....	42
Abbildung 15: Schematischer Verlauf der Sollgeschwindigkeit vor und nach Kommunikation des Haltewunsches (rote Linie).....	43
Abbildung 16: Realer Verlauf der Sollgeschwindigkeit vor und nach der Kommunikation des Haltewunsches.....	44
Abbildung 17: Variierte Distanz zum vorausfahrenden Fahrzeug. Die errechnete Distanz ergibt sich aus einem konstanten Sicherheitsabstand oder einer vorher definierten TTC. Oben wurde ein höherer Sicherheitsabstand bzw. eine höhere TTC eingestellt, unten eine niedrigere.	45
Abbildung 18: Kopplung des Software Frameworks (ADTF) und der Simulationsumgebung (VTD) für die Simulationsstudie.....	46

Abbildung 19: Datenbasis der Kreuzung Podbielskistraße – Eulenkamp – Klingerstraße in Hannover (Knotenpunkt 3).	47
Abbildung 20: Erstellte digitale Karten für VTD (links) und ADTF (rechts), basierend auf der Kreuzung Podbielskistraße – Eulenkamp – Klingerstraße in Hannover (Knotenpunkt 3)	47
Abbildung 21: Szenarien am Beispiel des Knotenpunktes 6. Einige Szenarien wurden ohne vorausfahrendes Fahrzeug bei einer Ego-Geschwindigkeit durchgeführt, einige Szenarien mit einem vorausfahrenden Fahrzeug (40 km/h bzw. 45 km/h). Die schwarzen Pfeile markieren die Fahrtrichtungen.....	49
Abbildung 22: Szenarien am Beispiel der Geraden 4. Das Ego-Fahrzeug folgt der Geraden mit 30 km/h bzw. 50 km/h. In einigen Szenarien kreuzt ein Fußgänger die Fahrbahn, dem das Fahrzeug Vorfahrt gewähren muss (oben). In anderen Szenarien befindet sich ein vorausfahrendes Fahrzeug auf dem Ego-Fahrestreifen mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h bzw. 10 km/h geringer als der Ego-Geschwindigkeit.	50
Abbildung 23: Schematische Darstellung der lateralen Abstände zum Gegenverkehr und zur Fußgängerin in Metern (m) bei lateralem Versatz nach links, keinem lateralen Versatz (Mitte), und lateralem Versatz nach rechts.....	52
Abbildung 24: Variationen des Szenarios aus Mitfahrersicht. Links: Radfahrer überquert die Straße von links. Rechts: Radfahrer überquert die Straße von rechts.	53
Abbildung 25: Variationen des Szenarios aus Mitfahrersicht. Links: Fußgänger überquert die Straße von links. Rechts: Fußgänger überquert die Straße von rechts.	53
Abbildung 26: Variationen des Szenarios aus der Außensicht eines schwächeren Verkehrsteilnehmers. Links: Automatisiertes Fahrzeug nähert sich der Einmündung von links. Rechts: Automatisiertes Fahrzeug nähert sich der Einmündung von rechts.	53
Abbildung 27: Risikoskala.....	56
Abbildung 28: SAM Dimensionen („Valenz“, Dominanz“ und „Anspannung“) (adaptiert nach Bradley & Lang, 1994, p. 51).	57
Abbildung 29: Subjektive Risikobewertung in Abhängigkeit der Stärke der Verzögerung für die drei unterschiedlichen Grundgeschwindigkeiten.	58
Abbildung 30: Mittlere Bewertungen der Probanden aus Mitfahrersicht auf den drei Dimensionen (Valenz, Anspannung, Dominanz) der SAM Skala.	59
Abbildung 31: Mittlere Risikobewertung aus Radfahrersicht in Abhängigkeit der Stärke der Verzögerung für die drei unterschiedlichen Grundgeschwindigkeiten.	60
Abbildung 32: Mittlere Bewertungen der Probanden aus Radfahrersicht auf den drei Dimensionen (Valenz, Anspannung, Dominanz) der SAM Skala.	61
Abbildung 33: Risikoskala mit Vorortung des Grenzrisikos.....	63
Abbildung 34: Ausgewählte Varianten des Fahrzenarios in der Abschlussbefragung. Links: Variante mit Fußgängerpräsenz, ohne Gegenverkehr. Mitte: Variante mit Gegenverkehr, ohne Fußgänger. Rechts: Variante mit Fußgänger, mit Gegenverkehr.	68

Abbildung 35: Antwortverteilung hinsichtlich der Frage, ob es als Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug schwierig ist, die Kontrolle an das Fahrzeug abzugeben.....	70
Abbildung 36: Erlebtes Risiko der Mitfahrer (Mittelwerte mit 95% Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgrößen Gegenverkehr (G), Fußgängerpräsenz (F) und ohne bzw. mit lateralem Versatz (L). Links sind die Teilergebnisse für den lateralen Versatz nach links dargestellt, auf der rechten Seite für den lateralen Versatz nach rechts.....	72
Abbildung 37: Erlebtes Risiko der Mitfahrer (Mittelwerte mit 95% Vertrauensintervall) in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (V).	73
Abbildung 38: Links: Vertrauen der Mitfahrer in die Automation (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgrößen Gegenverkehr (G) und Lateraler Versatz (L). Rechts: Vertrauen der Mitfahrer in die Automation (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgrößen Fußgängerpräsenz (F) und Lateraler Versatz (L).....	75
Abbildung 39: Vertrauen der Mitfahrer in die Automation (Mittelwerte mit 95% Vertrauensintervall) in Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit (V).....	76
Abbildung 40: Vertrauen in die Automation mit bzw. ohne Verzögerung (Mittelwerte mit 95% Vertrauensintervall) in Abhängigkeit des lateralen Versatzes im eigenen Fahrstreifen (L).....	76
Abbildung 41: Links: Nachvollziehbarkeit des Fahrverhalten (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgrößen Gegenverkehr (G) und Lateraler Versatz (L). Rechts: Nachvollziehbarkeit des Fahrverhaltens (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgrößen Fußgängerpräsenz (F) und Lateraler Versatz (L).	79
Abbildung 42: Nachvollziehbarkeit des Fahrverhaltens (Mittelwerte mit 95% Vertrauensintervall) in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (V).	79
Abbildung 43: Bewertung der gefahrenen Geschwindigkeiten (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgrößen Gegenverkehr (G) und Lateraler Versatz (L).	81
Abbildung 44: Bewertung der gefahrenen Geschwindigkeit (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgrößen Geschwindigkeit (V) und Lateraler Versatz (L).	82
Abbildung 45: Bewertung der gefahrenen Geschwindigkeiten (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgröße Fußgängerpräsenz (F).....	83
Abbildung 46: Bewertung des lateralen Abstands zu den Parkständen (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgrößen Fußgängerpräsenz (F) und Lateraler Versatz (L).	85
Abbildung 47: Bewertung des lateralen Abstands zu den Parkständen (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgröße Gegenverkehr (G).....	85
Abbildung 48: Bewertung des lateralen Abstands zu den Parkständen mit bzw. ohne Verzögerung (Mittelwerte mit 95% Vertrauensintervall) in Abhängigkeit des lateralen Versatzes im eigenen Fahrstreifen (L).	86

Abbildung 49: Links: Bewertung des lateralen Abstands zur Fußgängerin (Mittelwerte mit 95% Vertrauensintervall) in Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit (V). Rechts: Bewertung des lateralen Abstands zur Fußgängerin (Mittelwerte mit 95% Vertrauensintervall) in Abhängigkeit des Gegenverkehrs (G).....	87
Abbildung 50: Bewertung des lateralen Abstands zur Fußgängerin (Mittelwerte mit 95% Vertrauensintervall) in Abhängigkeit vom lateralen Versatz im eigenen Fahrstreifen (L).	88
Abbildung 51: Bewertung des lateralen Abstands zum Gegenverkehr (Mittelwerte mit 95% Vertrauensintervall) in Abhängigkeit vom lateralen Versatz im eigenen Fahrstreifen (L) und der Geschwindigkeit (V).....	90
Abbildung 52: Geschwindigkeitsveränderung (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt (M).	93
Abbildung 53: Links: Veränderung der lateralen Position (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgrößen Gegenverkehr (G) und Messzeitpunkt (M; vor vs. während der Fußgängerinteraktion).	95
Abbildung 54: Links: Distanz zur Haltelinie zum idealen Bremszeitpunkt (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) bei 30 km/h in Abhängigkeit der Perspektive (P), Verkehrsteilnehmer (V) und Richtung (R). Rechts: Distanz zur Haltelinie beim letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) bei 30 km/h in Abhängigkeit der Perspektive (P), Verkehrsteilnehmer (V) und Richtung (R).....	104
Abbildung 55: Distanz zur Haltelinie zum idealen Bremszeitpunkt (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) bei 50 km/h in Abhängigkeit der Perspektive (P), Verkehrsteilnehmer (V) und Richtung (R).	105
Abbildung 56: Distanz zur Haltelinie zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) bei 50 km/h in Abhängigkeit der Einflussgrößen Verkehrsteilnehmer (V) und Richtung (R). Rechts: Distanz zur Haltelinie zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) bei 50 km/h in Abhängigkeit der Perspektive (P), Verkehrsteilnehmer (V) und Richtung (R).	106
Abbildung 57: Links: Risikobewertung zum idealen Bremszeitpunkt bei 30 km/h (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Perspektive (P), Verkehrsteilnehmer (V) und Richtung (R). Rechts: Risikobewertung beim letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) bei 30 km/h in Abhängigkeit der Perspektive (P), Verkehrsteilnehmer (V) und Richtung (R).	109
Abbildung 58: Links: Risikobewertung zum idealen Bremszeitpunkt bei 50 km/h (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Perspektive (P), Verkehrsteilnehmer (V) und Richtung (R). Rechts: Risikobewertung beim letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) bei 50 km/h in Abhängigkeit der Perspektive (P), Verkehrsteilnehmer (V) und Richtung (R).	110

Abbildung 59: Das Forschungsfahrzeug "Vehicle-in-the-Loop" (ViL) in der Außenansicht (Foto: Institut für Regelungstechnik).....	119
Abbildung 60: Links: Ein Proband mit aufgesetzter VR-Brille. Rechts: Beispielhafte Sicht des Probanden durch die VR-Brille während einer Fahrt in der simulierten Umgebung (Foto: Institut für Regelungstechnik).....	119
Abbildung 61: Headtracking System auf dem Armaturenbrett (weiß), welches die Kopfposition und Kopfbewegung des Probanden detektiert, sodass diese bei der Bildgenerierung in der Simulation berücksichtigt werden kann (Foto: Vanessa Stange).....	120
Abbildung 62: Im Cockpit verbauter Knopf, der für die Auslösung des Haltevorgangs aus Fahrscenario „Einmündung“ genutzt wurde (Fotos: Susanne Ernst).....	121
Abbildung 63: Im Fußraum des Beifahrers verbaute Fahrschulpedalerie, über die die Sicherheitsfahrer in die Fahrzeugführung eingreifen konnte (Foto: Susanne Ernst).	121
Abbildung 64: Oben: Versuchsgelände Flugplatz Peine-Eddesse aus der Vogelperspektive (Foto: Google Maps). Die gelb eingerahmte Fläche wurde für die Probandenstudien genutzt. Unten: Blick zu den Gebäuden. Der gelbe Punkt oben in der Abbildung markiert den Standort, der blaue Pfeil die Blickrichtung. (Foto: Susanne Ernst).	122
Abbildung 65: Kopplung des Software Frameworks (ADTF) und der Simulationsumgebung (VTD) auf ViL für die Probandenstudie. (Foto: Jan Richelmann).....	123
Abbildung 66: Erstellung einer digitalen Karte (links) und einer 3D modellierten Welt für VTD im ROD (Road Network Editor) (rechts).....	124
Abbildung 67: Erstellung eines Szenarios im Scenario Editor in VTD (links) und die entsprechende 3D modellierte Welt (rechts).	124
Abbildung 68: Umgebungsmodell in ADTF.....	125
Abbildung 69: Errechnete Informationen der Fahrfunktion in ADTF auf Basis des Umfeldmodells.....	126
Abbildung 70: Erstellung identischer digitaler Karten für ADTF und VTD.....	127
Abbildung 71: Bereiche der digitalen Karte, in denen das Fahrscenario „Gerade Hauptstraße“ und das Einmündungsszenario durchgeführt wurden.....	128
Abbildung 72: Aufbau des Szenarios „Gerade Hauptstraße“.....	129
Abbildung 73: Links: Distanzen zur Fahrstreifenmitte und den Fahrstreifenbegrenzungen beim lateralen Versatz nach links. Rechts: Geschwindigkeiten der dynamischen Verkehrsteilnehmer.	130
Abbildung 74: Distanzen zu den anderen Verkehrsteilnehmern beim lateralen Versatz nach links.	130
Abbildung 75: Perspektive des Probanden im Szenario „Gerade Hauptstraße“.....	131
Abbildung 76: Aufbau des Einmündungsszenarios. Links: Variation mit Fußgänger. Rechts: Variation mit Fahrradfahrer.....	132
Abbildung 77: Beispielhafte Daten für das Einmündungsszenario bei Ego-geschwindigkeit = 30 km/h und einem kreuzenden Fahrradfahrer. Der Zeitpunkt des Haltewunsches ist in Rot dargestellt. Der Geschwindigkeitsverlauf des Ego-Fahrzeugs (blau) und des Fahrradfahrers (grün) sind ebenfalls abgebildet.....	133
Abbildung 78: Beispielhafte Daten für das Einmündungsszenario bei Ego-geschwindigkeit = 30 km/h und einem kreuzenden Fahrradfahrer.	

Der Zeitpunkt des Haltewunsches ist in Rot, die Distanz zum Haltepunkt in Blau und die Distanz zum Fahrradfahrer in Grün.	133
Abbildung 79: Ego-Perspektive beim Heranfahren an die Einmündung. Der Fahrradfahrer befindet sich auf dem Bürgersteig auf der linken Seite der Einmündung.	134
Abbildung 80: Trajektorie des Ego-Fahrzeugs über den gesamten Verlauf des Fahr Szenarios hinweg. Links: Lateraler Versatz nach links. Rechts: Lateraler Versatz nach rechts.....	138
Abbildung 81: Links: Risikobewertung (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit des Gegenverkehrs (G). Rechts: Vertrauen in die Automation (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit des Gegenverkehrs (G).	139
Abbildung 82: Risikobewertung (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit des Bremszeitpunkts (B).....	142
Abbildung 83: Links: Vertrauen in die Automation (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit des Bremszeitpunkts (B). Rechts: Kontrollverlust (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit des Bremszeitpunkts (B).....	142
Abbildung 84: Distanz zur Haltelinie (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit des Bremszeitpunkts (B) und der Geschwindigkeit (G). ...	144
Abbildung 85: Kopplung des Software Frameworks (ADTF) und der Simulationsumgebung (VTD) für die Simulationsstudie.....	149
Abbildung 86: Datenbasis der Kreuzung Podbielskistraße – Eulenkamp – Klingerstraße in Hannover (Knotenpunkt 3).	150
Abbildung 87: Erstellte digitale Karten für VTD (links) und ADTF (rechts), basierend auf der Kreuzung Podbielskistraße – Eulenkamp – Klingerstraße in Hannover (Knotenpunkt 3)	150
Abbildung 88: Szenarien am Beispiel des Knotenpunktes 6. Einige Szenarien wurden ohne vorausfahrendes Fahrzeug bei einer Ego-Geschwindigkeit durchgeführt, einige Szenarien mit einem vorausfahrenden Fahrzeug (40 km/h bzw. 45 km/h). Die schwarzen Pfeile markieren die Fahrtrichtungen.....	152
Abbildung 89: Szenarien am Beispiel der Geraden 4. Das Ego-Fahrzeug folgt der Geraden mit 30 km/h bzw. 50 km/h. In einigen Szenarien kreuzt ein Fußgänger die Fahrbahn, dem das Fahrzeug Vorfahrt gewähren muss (oben). In anderen Szenarien befindet sich ein vorausfahrendes Fahrzeug auf dem Ego-Fahrestreifen mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h bzw. 10 km/h geringer als der Ego-Geschwindigkeit.	153
Abbildung 90: Hannover-List SUMO-Netzwerk. Die grünen Markierungen kennzeichnen die Knotenpunkte mit zur Verfügung stehenden Detektorzählungen.	154
Abbildung 91: Lageplan für Knotenpunkt 1 - Vahrenwalder Str. / Hamburger Allee / Arndtstr.....	156
Abbildung 92: Exemplarische Datenaufbereitung für Knotenpunkt 1 Detektor 41. Oben links sind alle Detektordaten im gegebenen Zeitraum dargestellt. Die Filterung nach relevanten Wochentagen (Dienstag - Donnerstag) ergibt Ganglinien gemäß oben rechts. Nach Entfernen	

von Feier- und Ferientagen verbleiben die Ganglinien zu sehen in unten links. Finale Ganglinie ist unten rechts zu sehen.....	157
Abbildung 93: Kalibrierungsprozess für das longitudinale Fahrverhalten in SUMO.....	158
Abbildung 94: Ergebnisse der Kalibrierung für das konventionelle Fahrverhalten mit einer Abweichung von 4.6% (links) und das automatisierte Fahrverhalten mit einer Abweichung von 5.88% (rechts).	158
Abbildung 95: Fundamentaldiagramm für Risiko-Konfiguration „Aggressive“ im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen (HV) gemäß den Parametern in Tabelle 35.	160
Abbildung 96: Fundamentaldiagramm für alle Risiko-Konfigurationen.	160
Abbildung 97: Reisezeitverbesserung in Relation zum konventionellen Fahren für unterschiedliche Durchdringungsraten.	161
Abbildung 98: Risikoauswertung des Einmündungsszenarios der Pilotstudie. Risikoverhalten in verschiedenen Farben pro Proband. Durchschnittliches Risiko in Rot. Für Szenariendeklaration siehe Abschnitt 5.10.2.....	166
Abbildung 99: Risikoauswertung des Hauptstraßenszenarios der Pilotstudie. Risikoverhalten in versch. Farben pro Proband. Durchschnittliches Risiko in Rot.	167
Abbildung 100: Verteilungen des durchschnittlichen Risikos über alle Verkehrsteilnehmer im Szenario in Abhängigkeit von der Durchdringungsrate, exemplarisch für die Risikokonfiguration <i>default</i>	168
Abbildung 101: Verteilungen des durchschnittlichen Risikos über alle Verkehrsteilnehmer im Szenario in Abhängigkeit der Risikokonfiguration, exemplarisch für die Durchdringungsrate 60 %.....	169
Abbildung 102: Ausschnitt der inversen Verteilungsfunktion für exemplarische Kombinationen aus Risiko-Konfiguration und Durchdringungsrate.	170

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Straßenabschnitte für die Szenarien in der Simulationsstudie.....	48
Tabelle 2: Relevante Einflussgrößen auf das erlebte Risiko von Mitfahrern im automatisierten Fahrzeug.....	51
Tabelle 3: Variation der Einflussgrößen im Fahrscenario Einmündung aus der Innen- und Außensicht.	52
Tabelle 4: Versuchsplan der Fahrsimulatorstudie zur Befragungsmethodik mit den zwei Faktoren Geschwindigkeit und Bremsstärke.	54
Tabelle 5: Abstand (in m) des automatisierten Fahrzeugs zur Haltelinie bei Bremsbeginn in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit.	55
Tabelle 6: Versuchsplan für den ersten Teil der Fahrsimulatorstudie mit den Einflussgrößen Geschwindigkeit, Versatz, Gegenverkehr und Fußgängerpräsenz.	66
Tabelle 7: Versuchsplan für den zweiten Versuchsteil der Fahrsimulatorstudie mit den variierten Einflussgrößen Gegenverkehr und Geschwindigkeit.	66
Tabelle 8: Subjektive Messwerte der Fragebogenbefragung.....	67
Tabelle 9: Mögliche Verhaltensweisen automatisierter Fahrzeuge.....	68
Tabelle 10: Gemessene Fahrdaten und Beschreibung.	69
Tabelle 11: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf das erlebte Risiko von Mitfahrern im hochautomatisierten Fahrzeug. Dargestellt sind die F- und p-Werte der Varianzanalyse, die zugehörigen Freiheitsgrade (df) und die Schätzung der Effektgröße.	71
Tabelle 12: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf das Vertrauen von Mitfahrern im hochautomatisierten Fahrzeug. Dargestellt sind die F- und p-Werte der Varianzanalyse, die zugehörigen Freiheitsgrade (df) und die Schätzung der Effektgröße.	74
Tabelle 13: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf die Nachvollziehbarkeit des hochautomatisierten Fahrverhaltens für Mitfahrer im hochautomatisierten Fahrzeug. Dargestellt sind die F- und p-Werte der Varianzanalyse, die zugehörigen Freiheitsgrade (df) und die Schätzung der Effektgröße.	78
Tabelle 14: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf die Bewertung der Geschwindigkeit von Mitfahrern im hochautomatisierten Fahrzeug. Dargestellt sind die F- und p-Werte der Varianzanalyse, die zugehörigen Freiheitsgrade (df) und die Schätzung der Effektgröße.	81
Tabelle 15: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf die Bewertung des lateralen Abstands zu den Parkständen von Mitfahrern im hochautomatisierten Fahrzeug. Dargestellt sind die F- und p-Werte der Varianzanalyse, die zugehörigen Freiheitsgrade (df) und die Schätzung der Effektgröße.	84
Tabelle 16: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf die Bewertung des lateralen Abstands zur Fußgängerin.	87
Tabelle 17: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf die Bewertung des lateralen Abstands zum Gegenverkehr.....	89

Tabelle 18: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der Einflussgrößen Messzeitpunkt, und Gegenverkehr auf die Geschwindigkeitsveränderung.	92
Tabelle 19: Anteil der Probanden, die im analysierten Streckenabschnitt (Beginn des Fahr Szenarios bis zur Fußgängerin) bremsen (in %) und maximale Bremsstärke in Abhängigkeit des Gegenverkehrs (G) und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (V).	93
Tabelle 20: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der Einflussgrößen Messzeitpunkt, und Gegenverkehr auf die Geschwindigkeitsveränderung.	94
Tabelle 21: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf die Distanz zur Haltelinie zum idealen und letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt.....	103
Tabelle 22: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf das erlebte Risiko zum idealen und letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt.	108
Tabelle 23: Versuchsplan im Fahr Szenario „Gerade Hauptstraße“.....	118
Tabelle 24: Versuchsplan im Fahr Szenario „Einmündung“.....	118
Tabelle 25: Subjektive Messwerte der Fragebogenbefragung.....	135
Tabelle 26: Risiko- und Komforterleben der Mitfahrer (Mittelwerte und Standardabweichungen) für jede Variante des Fahr Szenarios	138
Tabelle 27: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf das Risiko- und Komforterleben von Mitfahrern im hochautomatisierten Fahrzeug. Dargestellt sind die F- und p-Werte der Varianzanalyse, die zugehörigen Freiheitsgrade (df) und die Schätzung der Effektgröße.	139
Tabelle 28: Risiko- und Komforterleben der Mitfahrer (Mittelwerte und Standardabweichungen) für jede Variante des Fahr Szenarios.....	140
Tabelle 29: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf das Risiko- und Komforterleben von Mitfahrern im hochautomatisierten Fahrzeug. Dargestellt sind die F- und p-Werte der Varianzanalyse, die zugehörigen Freiheitsgrade (df) und die Schätzung der Effektgröße.	141
Tabelle 30: Distanz zur Haltelinie (Mittelwerte und Standardabweichungen) für jede Variante des Fahr Szenarios.....	143
Tabelle 31: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf die Distanz zur Haltelinie bei Betätigung des Knopfes. Dargestellt sind die F- und p-Werte der Varianzanalyse, die zugehörigen Freiheitsgrade (df) und die Schätzung der Effektgröße.	143
Tabelle 32: Straßenabschnitte für die Szenarien in der Simulationsstudie.....	151
Tabelle 33: Informationen zum SUMO-Netzwerk	154
Tabelle 34: Knotenpunkte mit zur Verfügung stehenden Detektorzählungen.....	155
Tabelle 35: Risiko-Konfigurationen der automatisierten Fahrzeuge.	159
Tabelle 36: Übersicht über die 95 %-Risikoquantile aller untersuchten Risiko-Konfigurationen und Durchdringungsraten der automatisierten Fahrzeuge, normiert auf das vollständig menschliche Fahrverhalten (PR 0 %).	170

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Die Fachwelt ist sich weitgehend einig, dass die technischen Voraussetzungen für hoch- und vollautomatisiertes Fahren einen Stand erreicht haben, der in den kommenden Jahren dessen schrittweise Einführung erlauben wird. Mit der Vision des automatisierten Straßenverkehrs gehen Erwartungen einher, dass bessere Teilhabemöglichkeiten geschaffen werden, die Effizienz des Verkehrsablaufs erhöht und die Verkehrssicherheit verbessert werden wird.

Gleichzeitig zeigt jedoch die gesellschaftspolitische Debatte, dass der öffentliche Straßenraum auch weiterhin allen Nutzungen offenstehen muss. Dies gilt insbesondere für städtische Straßen, deren Funktion als Stadtraum für den Aufenthalt zunehmend an Bedeutung gewinnt. Automatisiertes Fahren wird diese Randbedingungen gerade in Städten berücksichtigen und sich im Mischverkehr mit Fußgängern, Radfahrern und konventionellen Kraftfahrzeugen harmonisch einfügen müssen. Dies bedingt, dass auch im komplexen städtischen Mischverkehr die objektive und die gefühlte Verkehrssicherheit auf einem mindestens gleichwertigen und erwartet höheren Niveau liegen müssen, als dies bei rein menschlichen Verkehrsteilnehmern derzeit erreicht wird.

Gerade in der Begegnung zwischen Kraftfahrzeugen und den schwachen Verkehrsteilnehmergruppen der Fußgänger und Radfahrer sind aufgrund von deren häufig schwer vorhersehbarem Verhalten Konfliktsituationen zu bewältigen, die im heutigen konventionellen Verkehr durch menschliche Fahrer mit Hilfe der Fahrerfahrung, der damit verbundenen Antizipationsfähigkeit und auch durch Kommunikation und Abstimmung gelöst werden. Das verbleibende Risiko durch menschliche Fehler in der Wahrnehmung, bei Entscheidungen und in der Fahrzeugführung wird dabei gesellschaftlich toleriert. Die Erwartung für automatisierte Fahrzeuge ist allerdings, dass diese das Risiko zumindest nicht erhöhen sollten, besser noch verringern sollten.

Vor dem Hintergrund dieser hohen Erwartungen an hoch- und vollautomatisierte Fahrzeuge bezüglich der Verkehrssicherheit stellt sich die Herausforderung, Konfliktsituationen frühzeitig mit der integrierten Sensorik zu erkennen, um angemessen mit den entwickelten Fahrfunktionen reagieren zu können. Fehler resultieren dabei aus der Unmöglichkeit, alle Situationen vorhersehen zu können, aus prinzipbedingten Funktionsgrenzen in der Wahrnehmung und aus der Tatsache, dass Menschen als Verkehrsteilnehmer unvorhersehbare Handlungen ausführen. Dabei besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Fahrgeschwindigkeit und Abständen einerseits und dem Kollisionsrisiko andererseits. Je geringer die Geschwindigkeit und je größer die Abstände sind, umso mehr Zeit bleibt für sichere Reaktionen, sodass damit die Verkehrssicherheit erhöht werden kann.

Allerdings führen eine geringe Fahrtgeschwindigkeit und große Abstände direkt zu einer geringeren Effizienz des Verkehrsablaufs. Die Verkehrssicherheit ist damit negativ mit der Effizienz des Verkehrsablaufs verbunden. Oder: Je höher die Effizienz des Verkehrsablaufs sein soll, umso mehr Risiko entsteht dadurch für Kollisionen.

- Aus diesem Zusammenhang heraus stellt sich für die Einführung des automatisierten Fahrens die entscheidende Frage, welches Ausmaß an Risiko, das durch das Fahrverhalten hoch- und vollautomatisierter Fahrzeuge für Fußgänger und Radfahrer entsteht, gesellschaftlich akzeptiert wird.

- Daraus ergibt sich die weitere Frage, welche Auswirkungen ein solches akzeptables Risiko (Sicherheitsniveau) auf die Qualität des Verkehrsablaufs in Städten haben wird.

In diesem Forschungsprojekt wurde zunächst untersucht, wie sich das resultierende objektive Risiko in Abhängigkeit der Auslegung der Fahrfunktionen automatisierter Fahrzeuge im Vergleich zu manuell gefahrenen Fahrzeugen formal beschreiben lässt. Damit lässt sich abschätzen, inwieweit durch automatisierte Fahrzeuge dieses objektive Risiko zumindest auf dem Niveau des menschlichen Fahrers bleibt, möglicherweise sogar das Risiko verringert.

Von besonderer Bedeutung für die gesellschaftliche Akzeptanz ist neben diesem objektiven Risiko das erlebte Risiko – welches Ausmaß an erlebtem Risiko akzeptieren Fußgänger und Radfahrer in der Interaktion mit automatisierten Fahrzeugen? Im Rahmen des Projekts wurde deshalb eine Methodik entwickelt, um dieses akzeptable Risiko in ausgewählten prototypischen Interaktionssituationen im Fahrsimulator und im Realverkehr messen zu können.

Dieses akzeptable Risiko stellte dann die Rahmenbedingungen dar für die Auslegung der Fahrfunktionen automatisierter Fahrzeuge in der Interaktion mit Fußgängern und Radfahrern. Deren Auslegung sollte so gewählt werden, dass sie zu einem (noch) akzeptablen erlebten Risiko durch Fußgänger und Radfahrer führt, gleichzeitig aber die Effizienz des Verkehrs möglichst wenig verringert. Wie oben beschrieben, spielen dabei Abstände und Geschwindigkeit eine wesentliche Rolle.

Im Rahmen des Projekts wurde für prototypische Szenarien untersucht, welche Auslegung der Fahrfunktionen im Hinblick auf Abstände und Geschwindigkeit zu wählen sind, um damit im Bereich des akzeptablen erlebten Risikos zu bleiben. Damit werden die Grenzen beschrieben, innerhalb dessen sich die Auslegungen automatisierter Fahrfunktionen bewegen müssen.

Ausgehend von diesen Ergebnissen wurde dann mit Hilfe von Simulationen geprüft, zu welchem objektiven Risiko es führt, wenn die Auslegungen sich innerhalb dieser über das erlebte Risiko definierten Grenzen bewegen und wie sich diese Auslegungen auf die Verkehrseffizienz auswirken. Damit konnte beschrieben werden, inwieweit die Leistungsfähigkeit innerstädtischer Verkehrsnetze von der Risikobereitschaft der vollautomatisierten Fahrzeuge abhängt, wobei diese Risikobereitschaft durch das erlebte akzeptable Risiko begrenzt wird.

Damit wurde insgesamt der Zusammenhang zwischen erlebtem Risiko und den dadurch zu definierenden akzeptablen Auslegungen von Fahrfunktionen automatisierter Fahrzeuge für prototypische, städtische Szenarien dargestellt, um deren Auswirkungen auf das objektive Risiko und die Verkehrseffizienz zu beschreiben. Das Projekt leistet damit nicht nur einen Beitrag zur menschenzentrierten Auslegung automatisierter Fahrfunktionen, die eine hohe Akzeptanz im Mischverkehr erreichen, sondern auch weitergehend eine Beschreibung der Auswirkungen dieser Anpassungen auf das städtische Verkehrssystem im Hinblick auf objektives Risiko und Effizienz.

1.2 Zielsetzung und Arbeitsmethodik

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Untersuchung und Beschreibung des Zusammenhangs zwischen dem akzeptablen erlebten Risiko der Fahrfunktion automatisierter Fahrzeuge und der Leistungsfähigkeit von typischen innerstädtischen Verkehrsnetzen im Hinblick auf objektives Risiko und Effizienz.

Dazu wurden die Interaktionen zwischen Fußgängern, Radfahrern und automatisierten Fahrzeugen im urbanen Mischverkehr betrachtet. Eine belastbare Beurteilung dieser für die Einführung automatisierten Fahrens wesentlichen Fragestellung erforderte die folgende methodische Herangehensweise:

- 1) Modellierung von Mischverkehr mit Integration einer automatisierten Fahrfunktion.
- 2) Adaption einer Fahrfunktion eines automatisierten Fahrzeugs zur Variation des resultierenden erlebten Risikos.
- 3) Ableitung von aus Sicht von Fußgängern und Radfahrern akzeptablen Auslegungen der Fahrfunktion im Hinblick auf das erlebte Risiko.
- 4) Analyse und Bewertung von unterschiedlichen Risikograden der automatisierten Fahrfunktion im Hinblick auf die Sicherheit und Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems Straßenverkehr.

Im **ersten Teil** wurde die Interaktion zwischen automatisierten Fahrzeugen und anderen Verkehrsteilnehmern in verschiedenen Szenarien untersucht und typische Verhaltensweisen der Verkehrsteilnehmer, insbesondere der automatisierten Fahrzeuge, bestimmt. Darauf aufbauend wurde die vom IVS und IRZ entwickelte Simulationssoftware MODIS, eine Software zur Beschreibung der Bewegung und der Konfliktlösung von Fußgängern, Radfahrern und des motorisierten Individualverkehrs (MIV), so erweitert, dass die Fahrfunktionen eines automatisierten Fahrzeugs des IfR dort dargestellt werden konnten. Weiter wurden mögliche Auslegungen der Fahrfunktion in ausgewählten Szenarien in den Fahrsimulator des IV implementiert, um das Verhalten dort für Fußgänger und Radfahrer erlebbar zu machen.

Im **zweiten Teil** wurde das Risikoerleben von Fußgängern und Radfahrern bei unterschiedlichen Auslegungen des automatisierten Fahrzeugs untersucht. Akzeptable Auslegungen wurden dann in das Modell für den Mischverkehr integriert, sodass damit die Voraussetzungen für eine Bewertung des Verkehrsablaufs für bestimmte Auslegungen im Hinblick auf Effizienz und objektives Risiko geschaffen wurden. Zusätzlich wurden auf Basis der Fahrsimulatorversuche ausgewählte Szenarien und Auslegungen im Vehicle-in-the-Loop implementiert, umso eine Validierung der Ergebnisse zum erlebten Risiko im Realverkehr vorzunehmen.

Im **dritten Teil** wurde untersucht, wie sich das gewählte erlebte Risiko auf die Qualität und Sicherheit des Verkehrsablaufs auswirkt. Wesentlich sind dabei die Auswirkungen von Fahrweisen unter Annahme eines bestimmten Risikos auf die Kapazitäten sowie die Verbindungsqualitäten und Erreichbarkeiten in typischen städtischen Straßennetzen, außerdem auf das objektive Risiko im Vergleich zu manuell gefahrenen Fahrzeugen. Die Ergebnisse der Simulationen wurden für die unterschiedlichen Risikoauslegungen eines automatisierten Fahrzeugs hinsichtlich dem Einfluss auf die Verkehrsqualität ausgewertet und erlauben so eine Gegenüberstellung der Gesamtleistungsfähigkeit und der Verkehrssicherheit. Insbesondere wurde mit Hilfe dieser Bewertungsmethodik eine belastbare Aussage abgeleitet, welche Systemleistungsfähigkeit und welches Risiko bei einem hohen erforderlichen Mindeststandard der Sicherheitsauslegung automatisierter Fahrzeuge erzielt werden kann.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Im Folgenden wird zunächst der Forschungsstand hinsichtlich der Interaktionen zwischen automatisierten Fahrzeugen und menschlichen Verkehrsteilnehmern kurz dargestellt. Dabei spielt einerseits das Erleben des Fahrverhaltens des automatisierten Fahrzeugs aus Sicht der Mitfahrer (Passagiere) eine wesentliche Rolle, um damit die Akzeptanz dieser Fahrzeuge als Nutzer zu untersuchen. Andererseits geht es um die Interaktion von menschlichen Verkehrsteilnehmern als Fahrer von Pkw, als Fußgänger oder als Radfahrer mit automatisiertem Verkehr, also die Außensicht auf diese automatisierten Fahrzeuge. Hier geht es mehr um die Akzeptanz dieser automatisierten Fahrzeuge im Verkehr, d.h. als weitere Verkehrsteilnehmer, also um die gesellschaftliche Akzeptanz dieser neuen Art von Mobilität.

Ergänzt wird dies um den Stand der Forschung hinsichtlich der Modellierung des objektiven Risikos und des Verkehrssystems unter besonderer Berücksichtigung schwächerer Verkehrsteilnehmer, wobei zusätzlich das Verhalten der automatisierten Fahrzeuge modelliert werden muss, um Effekte auf das Verkehrssystem abschätzen zu können.

2.1 Interaktionen zwischen menschlichen Verkehrsteilnehmern und automatisierten Fahrzeugen

In der Zukunft werden sich neben menschlichen Verkehrsteilnehmern zunehmend auch hochautomatisierte Fahrzeuge (Level 4; SAE, 2014, 2018) im urbanen Raum bewegen (siehe VDA, 2020). Hochautomation bedeutet laut J3016 Standard (SAE, 2014, 2018), dass der menschliche Fahrer zum Mitfahrer wird. Er gibt die Fahraufgabe für die gesamte Fahrt innerhalb eines räumlich eingeschränkten Gebiets, d.h. im urbanen Raum, vollständig an das hochautomatisierte Fahrzeug ab. Im Unterschied zum Automatisierungslevel 3 dient der menschliche Mitfahrer nicht mehr als Rückfallebene beim Erreichen von Systemgrenzen. Stattdessen überführt das hochautomatisierte Fahrzeug sich selbst – wenn notwendig - in einen risikominimalen Zustand.

In Folge der Einführung hochautomatisierter Fahrzeuge entsteht ein Mischverkehr, in dem Interaktionen zwischen menschlichen Verkehrsteilnehmern zunehmend durch Interaktionen zwischen menschlichen Verkehrsteilnehmern und hochautomatisierten Systemen ersetzt werden. Dabei spielen im städtischen Raum Interaktionen zwischen Fußgängern und Radfahrern und automatisierten Fahrzeugen eine wesentliche Rolle.

Seit einiger Zeit erproben Projektkonsortien bereits hochautomatisiertes Fahren im öffentlichen Straßenverkehr in mehreren europäischen Städten, z.B. CityMobil 2 (Alessandrini et al., 2014), EUREF (Nordhoff et al., 2018), und WePods (Liang et al., 2016). Diese Forschungsprojekte untersuchen den Personentransport mit Shuttles. Die Shuttles fahren auf vordefinierten Fahrwegen und transportieren mit geringer Geschwindigkeit bis zu 10 Fahrgäste unter menschlicher Aufsicht (Nordhoff et al., 2018).

Aus technischer Sicht ist die Programmierung einzelner, hochautomatisiert fahrender Pkw aufgrund der hohen Komplexität speziell im urbanen Raum sehr anspruchsvoll (z.B. Hubmann et al., 2016; Nolte et al., 2018; Thornton et al., 2017; Völz, 2020). Die Infrastruktur in der Stadt ist vom Layout her sehr variabel (Lee et al., 2020) und automatisierte Fahrzeuge interagieren nicht nur mit menschlichen Fahrern, sondern auch mit schwächeren Verkehrsteilnehmern (Ackermann et al., 2019). Diese Interaktionen, vor allem mit Fußgängern, sind mit Ausnahme kurzfristiger Verhaltensprädiktionen schlecht

vorhersehbar (Völz, 2020). Deshalb ist mit der flächendeckenden Einführung hochautomatisiert fahrender Level 4 Pkw (SAE, 2014, 2018) im urbanen Raum erst in etwa 10 bis 15 Jahren (Tabone et al., 2021), circa ab dem Jahr 2030 (siehe VDA, 2020), zu rechnen.

Neben den offensichtlichen Vorteilen für Mitfahrer in hochautomatisierten Fahrzeugen, könnten diese Fahrzeuge die Verkehrssicherheit für schwächere Verkehrsteilnehmer verbessern (Tabone et al., 2021). Eine Maximierung der Sicherheit schwächerer Verkehrsteilnehmer würde allerdings dazu führen, dass das Verkehrssystem insgesamt an Effizienz verliert, denn hochautomatisierte Fahrzeuge müssten dann sehr langsam und defensiv fahren, um wirklich eine höhere Sicherheit als menschliche Fahrer garantieren zu können. Das wäre wiederum nicht im Interesse der Mitfahrer in hochautomatisierten Fahrzeugen, denn Menschen wollen sicher und schnell zu ihrem Fahrtziel gelangen (Cnossen, 2000). Daraus könnte sich ein Spannungsfeld zwischen den Interessen von Mitfahrern in automatisierten Fahrzeugen und schwächeren Verkehrsteilnehmern ergeben. Bis zur Einführung hochautomatisiert fahrender Pkw im urbanen Raum ab 2030 ist entsprechend noch Zeit, um die Auslegung der Fahrfunktion im Hinblick auf Effizienz und Sicherheit an die Bedürfnisse menschlicher Verkehrsteilnehmer sowohl auf Seiten der Insassen als auch der schwächeren Verkehrsteilnehmer anzupassen.

Es stellt sich also die zentrale Frage, wie hochautomatisierte Fahrzeuge in der Interaktion mit schwächeren Verkehrsteilnehmern in Interaktionssituationen, z.B. an Knotenpunkten und Kreuzungen, fahren sollen, damit sich alle beteiligten Verkehrsteilnehmer (ausreichend) sicher fühlen. Gleichzeitig soll das Verhalten automatisierter Fahrzeuge aber auch möglichst effizient sein, wobei höhere Effizienz (z.B. durch eine höhere Geschwindigkeit) möglicherweise zu einer Reduktion des Sicherheitsgefühls der menschlichen Verkehrsteilnehmer führt. Die Frage ist daher, wie effizient automatisierte Fahrzeuge fahren dürfen, sodass sich menschliche Verkehrsteilnehmer (noch) hinreichend sicher fühlen, wenn sie diesen Fahrzeugen begegnen oder in ihnen unterwegs sind. Für diese Interaktionssituationen ist damit zu untersuchen, wie sich unterschiedliche Auslegungen einer automatisierten Fahrfunktion auf das Erleben von Risiko bzw. Sicherheit durch menschliche Verkehrsteilnehmer als Mitfahrer im Fahrzeug und als Interaktionspartner mit automatisierten Fahrzeugen auswirken. In diesen Interaktionssituationen gibt es zwei Sichtweisen, die einander ergänzen: Zum einen die Innensicht der Mitfahrer automatisierter Fahrzeuge und zum anderen die Außensicht schwächerer Verkehrsteilnehmer auf die automatisierten Fahrzeuge.

Aus Mitfahrersicht (Innensicht) lag der Fokus bisheriger psychologischer Forschung vor allem auf dem Komfort erleben von Mitfahrern während einer hochautomatisierten Fahrt, wohingegen zum erlebten Risiko im automatisierten Fahrkontext bislang nur wenig geforscht wurde (Brell et al., 2019). Fahrkomfort ist ein viel diskutiertes Konstrukt der Verkehrspsychologie, für das noch immer keine einheitliche Terminologie vorliegt (Beggiato et al., 2017; Bellem et al., 2018). Laut de Looze et al. (2003, S. 986) gibt es jedoch drei Aspekte, die den meisten Definitionen zugrunde liegen: Fahrkomfort ist subjektiv, wird von unterschiedlichen Einflussfaktoren (physischer, physiologischer, psychologischer Art) beeinflusst und stellt eine Reaktion auf die Umwelt dar. Zum Fahrkomfort von Mitfahrern im hochautomatisierten Fahrzeug liegen bereits erste Studien vor (z.B. Bellem et al., 2016, 2018; Hartwich et al., 2018). Diese zeigen unterschiedliche Befunde wie Fahrkomfort bei Mitfahrern entsteht. Während einige Studien finden, dass die Mehrheit der Mitfahrer einen automatisierten Fahrstil bevorzugt, der dem eigenen Fahrstil ähnelt (z.B. Griesche et al., 2016), zeigen andere Studien, dass dies nicht

unbedingt der Fall sein muss, damit sich Mitfahrer wohlfühlen (z.B. Bellem et al., 2018; Hartwich et al., 2018). Des Weiteren gibt es altersspezifische Präferenzen, wie eine Studie von Hartwich et al. (2018) zeigt. So bevorzugen ältere Mitfahrer einen „jungen“ Fahrstil, der, verglichen mit ihrem eigenen Fahrstil, dynamischer ist, wohingegen junge Fahrer einen Fahrstil bevorzugen, der ihrem eigenen ähnelt (Hartwich et al., 2018).

Vernachlässigt wurde bislang jedoch die Frage, wie es um den Fahrkomfort der Mitfahrer bei Interaktionen mit schwächeren Verkehrsteilnehmern an Kreuzungen und Knotenpunkten steht. Vorangegangene Forschung im manuellen Verkehr zeigt, dass menschliche Fahrer Interaktionen mit schwächeren Verkehrsteilnehmern als besonders kritisch bewerteten (siehe Winkler et al., 2018). Entsprechend ist anzunehmen, dass ein hochautomatisiertes Fahrzeug insbesondere Interaktionen mit schwächeren Verkehrsteilnehmern souverän meistern sollte, damit sich Mitfahrer im Innern des Fahrzeugs sicher fühlen.

Aus Mitfahrersicht ergeben sich damit die folgenden zentralen Fragestellungen:

- Wie ändert sich das erlebte Risiko als Mitfahrer im hochautomatisierten Fahrzeug in der Interaktion mit schwächeren Verkehrsteilnehmern in Abhängigkeit der Auslegung der automatisierten Fahrfunktion?
- Welches subjektive Risiko sind Mitfahrer in der Interaktion mit schwächeren Verkehrsteilnehmern bereit zu akzeptieren (Grenzrisiko)?

Von der Außensicht schwächerer Verkehrsteilnehmer auf automatisierte Fahrzeuge stellt die Einführung dieser Fahrzeuge schwächere Verkehrsteilnehmer vor die Herausforderung, dass sie weniger mit dem Fahrer im Innern des hochautomatisierten Fahrzeugs interagieren, sondern stärker mit dem Fahrzeug selbst.

Aus diesem Grund gewinnt das Fahrverhalten automatisierter Fahrzeuge im Sinne von außen sichtbaren Fahrzeugbewegungen an Bedeutung. Hierbei lag der Fokus der bisherigen Forschung vor allem auf der Interaktion automatisierter Fahrzeuge mit Fußgängern (z.B. Ackermann et al., 2019; Fuest et al., 2018, 2019; Rothenbücher et al., 2016). Demgegenüber fand die Interaktion zwischen hochautomatisierten Fahrzeugen und Radfahrern bislang wenig Beachtung in der Forschung (Fritz et al., 2020; Hagenzieker et al., 2020).

Hinsichtlich automatisierten Fahrverhaltens in der Interaktion mit Fußgängern untersuchten Studien, ob automatisierte Fahrzeuge mittels Fahrzeugbewegung, vor allem durch das Verzögerungsverhalten, in der Lage sind, Verhaltensabsichten (z.B. Fußgänger vorlassen, Weiterfahren) an Fußgänger zu kommunizieren (z.B. Ackermann et al., 2019; Fuest et al., 2018, 2019). Insgesamt zeigen die Studien übereinstimmend, dass Fußgänger in nahezu allen Fällen die Intentionen automatisierter Fahrzeuge anhand des Fahrverhaltens korrekt erkannten. Jedoch nahmen Fußgänger diese Interaktionen mit automatisierten Fahrzeugen in Abhängigkeit von der Intention des automatisierten Fahrzeugs unterschiedlich kritisch wahr (siehe Fuest et al., 2018). Damit liegen hier bereits erste Ergebnisse vor, die darauf hinweisen, dass die Auslegung des Fahrverhaltens automatisierter Fahrzeuge zu Veränderungen im Erleben dieses Verhaltens durch schwächere Verkehrsteilnehmer führt. Die bereits beschriebene Balance aus Effizienz und erlebter Sicherheit muss damit bei der Auslegung automatisierter Fahrfunktionen gerade in der Interaktion mit schwächeren Verkehrsteilnehmern eine wesentliche Rolle spielen.

Aus der Außensicht schwächerer Verkehrsteilnehmer in der Interaktion mit hochautomatisierten Fahrzeugen ergeben sich damit folgende zentrale Fragestellungen:

- Wie ändert sich das erlebte Risiko schwächerer Verkehrsteilnehmer in der Interaktion mit einem hochautomatisierten Fahrzeug in Abhängigkeit der Auslegung der automatisierten Fahrfunktion?
- Welches subjektive Risiko sind schwächere Verkehrsteilnehmer in der Interaktion mit hochautomatisierten Fahrzeugen bereit zu akzeptieren (Grenzrisiko)?

Sowohl aus Innensicht als auch aus Außensicht hat daher das erlebte Risiko eine zentrale Bedeutung. Der folgende Abschnitt beschreibt zunächst den psychologischen Risikobegriff im Straßenverkehr näher und erläutert theoriebasiert, welche Einflussfaktoren zum erlebten Risiko beitragen und wie menschliche Fahrer mit Risiken im Straßenverkehr umgehen.

2.2 Erlebtes Risiko im Straßenverkehr

Beim manuellen Fahren unterscheidet Fuller (2005) drei Arten von Risiko: (1) objektives Risiko (*objective risk*), (2) subjektives Risiko (*subjective risk*) und (3) das erlebte, wahrgenommene Risiko (*feeling of risk*). Das objektive Risiko bezeichnet die (statistische) Wahrscheinlichkeit, dass es zu einem Unfall kommt. Das subjektive Risiko ist die individuelle Einschätzung eines Fahrers, wie groß das objektive Risiko ist, d. h. wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass es zu einem Unfall kommt.

Allerdings sind Unfälle im Straßenverkehr sehr seltene Ereignisse. Im Jahr 2019 lag die Gesamtfahrleistung bei rund 739 Milliarden gefahrenen Kilometern. Davon wurden rund 638 Milliarden Kilometer von Pkw (85.6 %) zurückgelegt (Krafftfahrtbundesamt, 2020). Die Anzahl der Unfälle mit Pkw-Beteiligung und Personenschaden belief sich auf rund 357.000 polizeilich erfasste Unfälle (Destatis, 2020). Das entspricht einem Unfall pro 1.76 Millionen gefahrener Kilometer. Rein statistisch betrachtet, liegt also die objektive Wahrscheinlichkeit einen Autounfall mit Personenschaden zu haben, pro gefahrenem Kilometer weit unter 1 %.

Risikoforschung hat gezeigt, dass Menschen dazu neigen, die Auftretenswahrscheinlichkeit (seltener) Lebensrisiken, z.B. bei einem tödlichen Auto-, Motorrad- oder Fußgängerunfall, zu überschätzen (GDV, 2016; siehe auch McKenna, 1982). Aus diesem Grund erscheint es nicht sinnvoll, Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug nach ihrer Einschätzung der Unfallwahrscheinlichkeit zu fragen. Demgegenüber ist das erlebte Risiko (*feeling of risk*) als erlebter Zustand von Furcht oder Unwohlsein sehr gut von Mitfahrern im automatisierten Fahrzeug einschätzbar, aber auch von schwächeren Verkehrsteilnehmern in Interaktionen mit automatisierten Fahrzeugen.

Beim manuellen Fahren haben menschliche Fahrer die Möglichkeit, die Fahraufgabe selbst so zu gestalten, dass sie sich beim Fahren wohlfühlen. Hier greift das Yerkes-Dodson-Gesetz (1908). Übertragen auf den Fahrkontext bedeutet das, dass die Leistung bzw. das Befinden des Fahrers dann optimal ist, wenn die Aktivierung im mittleren Bereich liegt, wohingegen sich eine zu geringe Aktivierung in Langeweile und Müdigkeit äußert. Eine zu hohe Beanspruchung geht mit Stress und Überforderung einher (Vollrath, & Krems, 2011). Es ist davon auszugehen, dass menschliche Fahrer danach streben, ihre Aktivierung beim Fahren so zu optimieren, dass diese (nahezu) ideal ist (Vollrath, & Krems, 2011).

Aber was genau optimieren menschliche Fahrer, um sich beim Fahren wohlfühlen? Diese Frage ist ein grundlegender Bestandteil einer verkehrspsychologischen Debatte, in der sich mehrere Theorien gegenüberstehen.

Die *Theory of Risk Homeostasis* (Wilde, 1982; Theorie der Risikohomöostase) geht davon aus, dass Fahrer das erlebte Risiko selbst beim Fahren optimieren. Die grundlegende Annahme dieser Theorie ist, dass Fahrer ein Ziellevel an Risiko (target risk) haben, d.h. Fahrer gehen ein für sie individuell akzeptables Risiko beim Fahren ein und suchen aber auch dieses bestimmte Ausmaß an Risiko. Um dieses Risikolevel aufrecht zu erhalten, gleichen Fahrer das erlebte Risiko in einer Fahrsituation kontinuierlich mit ihrem angestrebten Risikolevel ab. Kommt es zwischen dem angestrebten Risiko und dem erlebten Risiko zu Diskrepanzen, passen Fahrer ihr Verhalten in der jeweiligen Fahrsituation an, wobei das Gleichgewicht dieser beiden Risiken auch maßgeblich von kognitiven und motivationalen Faktoren abhängig ist. Zu diesen kognitiven Faktoren zählen beispielsweise Fahrerfahrung oder Ablenkungen während der Fahrt. Auf motivationaler Ebene haben beispielsweise Zeitdruck oder Langeweile während der Fahrt einen Einfluss auf das erlebte Risiko. Diese Theorie geht also davon aus, dass Fahrer bewusst ein bestimmtes, für sie akzeptables Risiko eingehen und dieses Risiko mittels Fahrverhalten austarieren. Schlussendlich hat dieses Verhalten zur Folge, dass Fahrer immer (ein wenig) riskant fahren.

Im Gegensatz dazu geht das *task-capability interface model* (Fuller, 2000, 2005, 2011) davon aus, dass menschliche Fahrer die Beanspruchung (erlebte task difficulty) optimieren. Menschliche Fahrer gestalten die Fahraufgabe also so schwierig, dass sie diese als angenehm erleben. Dabei ist die Optimierung der Beanspruchung ein kontinuierliches Abgleichen der Anforderungen der Situation (determinants of task demand) und den Fähigkeiten eines Fahrers (driver capability), diese Anforderungen zu bewältigen. Idealerweise sind die Fähigkeiten des Fahrers größer als die Anforderungen der Fahrsituation, sodass die Fahrsituation nicht als riskant erlebt wird. Dabei geht die Theorie davon aus, dass Fahrer hinsichtlich ihrer Beanspruchung individuelle obere und untere Grenzen setzen, welches nicht überschritten werden sollen. Um die Beanspruchung nach unten hin zu regulieren, passen Fahrer vor allem ihre Geschwindigkeit an. Zusammenfassend erleben Fahrer idealerweise kein Risiko beim Fahren, aber ein angenehmes Ausmaß von Beanspruchung.

Dass menschliche Fahrer beim Fahren kein Risiko erleben wollen, ist auch die Grundannahme der *Zero Risk Theory* (Näätänen, & Summala, 1974, 1976; Summala, 1988). Diese Theorie geht davon aus, dass Fahrer Risiken kontrollieren (risk control), anstatt diese auszutarieren, sodass erwartete Risiken bereits im Vorfeld vermieden werden (avoidance) bzw. wenn eine risikoreiche Situation bereits eingetreten ist, Fahrer dieser so schnell wie möglich zu entkommen suchen (escape). Die Risikokontrolle besteht im Wesentlichen in der Anpassung von Sicherheitsabständen (safety margins), welche aus subjektiver Sicht des Fahrers groß genug sind, um ausreichend zeitlichen und räumlichen Abstand zu einer Gefahrenquelle zu einzuhalten, sodass gar kein Risiko erlebt wird. Im Gegensatz zu den beschriebenen Theorien von Wilde (1982) und Fuller (2000, 2005, 2011) kontrollieren Fahrer nicht unmittelbar das Risiko oder die Beanspruchung, sondern die Sicherheitsabstände. Wie Fahrer jedoch die notwendige Größe eines Sicherheitsabstands in einer Fahrsituation bestimmen, bleibt in der Zero Risk Theory weitgehend ungeklärt (Fuller, 2005). Ähnlich wie Fuller (2011) geht die Zero Risk Theory aber auch davon aus, dass Fahrer kein Risiko erleben wollen.

Das Einhalten von Sicherheitsabständen zu Gefahrenquellen in der Fahrumgebung hat im *Comfort Zone Model* (Summala, 2007) eine ähnlich große Bedeutung wie in der beschriebenen Zero Risk Theory. Im *Comfort Zone Model* beschreibt Summala (2007) vier Aspekte, die den Fahrerkomfort und das erlebte Risiko eines Fahrers beeinflussen, darunter (1) das Fahrzeug-Straßensystem (*vehicle-road system*), (2) ein guter

Fahrtfortschritt (*good progress of trip*), (3) Einhaltung von Regeln und (4) Sicherheitsabstände (*safety margins*). Diese Aspekte können - zumindest teilweise - auf das Erleben von Mitfahrern im hochautomatisierten Fahrzeug übertragen werden, wobei der Aspekt der Sicherheitsabstände am relevantesten ist (Siebert et al., 2013). Die Sicherheitsabstände, welche menschliche Fahrer zu anderen Fahrzeugen, oder (nicht) beweglichen Objekten halten, unterliegen beim nicht-automatisierten Fahren einer großen Varianz zwischen den Fahrern, während die Sicherheitsabstände hochautomatisierter Fahrzeuge einer vordefinierten Konfiguration unterliegen (Siebert et al., 2013). Entsprechend relevant ist die Frage, wie diese Konfiguration beim hochautomatisierten Fahren ausgelegt sein soll, damit sich Mitfahrer während der Fahrt wohlfühlen.

Entsprechend dieser Darstellung ist zum jetzigen Zeitpunkt immer noch unklar, ob und welches Risiko oder Komfort menschliche Fahrer beim eigenen Fahren erleben wollen. Völlig unklar ist auch, ob und in welchem Ausmaß Mitfahrer in hochautomatisierten Fahrzeugen (Innensicht) oder Fußgänger und Radfahrern bei Interaktionen mit diesen Fahrzeugen (Außensicht) bereit sind, Risiken beim hochautomatisierten Fahren zu akzeptieren, und wenn ja, in welchem Ausmaß (Nolte et al., 2018).

- Im Hinblick auf hochautomatisiertes Fahren im urbanen Mischverkehr stellt sich entsprechend die Frage, wie sich das Fahrverhalten eines hochautomatisierten Fahrzeugs auf das erlebte Risiko eines Mitfahrers einerseits und das erlebte Risiko menschlicher Verkehrsteilnehmer andererseits auswirkt.
- Daran schließt sich unmittelbar eine weitere Frage an: Wie soll eine hochautomatisierte Fahrfunktion ausgelegt sein, damit sich alle beteiligten Verkehrsteilnehmer in der Interaktion mit diesem Fahrzeug wohlfühlen? Ist ein gewisses Ausmaß an Risiko akzeptabel oder sogar erstrebenswert, wie es die Theorie der Risikohomöostase nahelegt? Oder wird versucht, kein Risiko zu erleben, wie es das task-capability interface model oder die Zero Risk Theory annehmen?

2.3 Auslegungen automatisierter Fahrfunktionen für den städtischen Verkehr

Die Automatisierung von Straßenfahrzeugen wird in den fünf Automatisierungsgraden der SAE klassifiziert. Der heutige Stand der Technik bei Serienfahrzeugen wird durch Stufe 2 (teilautomatisiertes Fahren nach BAST) repräsentiert. In dieser Stufe hat der Mensch die Pflicht, den Straßenverkehr und das Verhalten der Teilautomation permanent zu überwachen. Höhere Automatisierungsgrade für Serienfahrzeuge werden aktuell eher im Bereich der Autobahnen diskutiert. Beispielsweise wird der Autobahnchauffeur im vom BMWi geförderten Projekt PEGASUS untersucht. Im Stadtbereich ist besonders die Interaktion mit Fußgängern und Radfahrern herausfordernd und wird in verschiedenen Projekten als Teil der Forschungsziele untersucht. Beispiele hierfür sind die EU-Projekte CityMobil2, interactiVe sowie das Schwerpunktprogramm „Kooperativ Interagierende Automobile“ (SPP 1835) der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Bei diesen Projekten geht es allerdings bislang darum, in diesen komplexen städtischen Situationen überhaupt automatisierte Fahrfunktionen zu entwickeln, die diese Situationen sicher lösen können.

Dem Konsortium sind jedoch bisher keine Fahrfunktionen bekannt, die variabel das Risiko, das sie durch ihr Fahren erzeugen, adaptieren können. Überlegungen zu Auslegungen, die sowohl für Mitfahrer als auch für andere menschliche

Verkehrsteilnehmer akzeptabel und angenehm sind, finden sich bisher praktisch nicht. Auch Untersuchungen zu Metriken für das Risiko und zu Grenzkrisiken im Straßenverkehr sind nicht bekannt.

Entsprechend ergibt sich die folgende Fragestellung für das Projekt:

- In welchem Maß können Fahrfunktionen hochautomatisierter Fahrzeuge im städtischen Verkehr so ausgelegt werden, dass damit ein möglichst effizienter Verkehr ermöglicht wird, gleichzeitig aber das erlebte Risiko für Mitfahrer in den hochautomatisierten Fahrzeugen und für Fußgänger und Radfahrer bei Interaktionen mit diesen Fahrzeugen akzeptabel bleibt?

2.4 Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf städtische Verkehrsqualität

Für den Fall, dass sich ausschließlich automatisierte Fahrzeuge im städtischen Verkehrsnetz befinden, wurde in einer mathematischen Untersuchung von Friedrich (2016) eine potentielle Steigerung der Verkehrskapazität von bis zu 40% ermittelt. Der kausale Zusammenhang zwischen der Durchdringungsrate automatisierter Fahrzeuge und der Steigerung der Verkehrskapazität wurde von Lu et al. (2020) in einer simulativen Studie bestätigt. Dabei wurde unter Verwendung einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation ein triviales Netzwerk, bestehend aus einem 8x8 Straßenraster, und zusätzlich ein Ausschnitt eines Realnetzwerks als Grundlage der Evaluierung verwendet. Für die Modellierung der Verkehrsteilnehmer wurde das Fahrzeugfolgmodell von Krauss (1998) parametrisiert, um das longitudinale Fahrverhalten zwischen konventionellen Fahrzeugen (keine Automatisierung) und vollautomatisierten Fahrzeugen zu differenzieren. Lu beruht dabei auf theoretischen Annahmen und unterscheidet die Auslegung im Wesentlichen hinsichtlich des geringeren zeitlichen sowie räumlichen Abstands von automatisierten Fahrzeugen zu vorausfahrenden Verkehrsteilnehmern. Die Ergebnisse der Evaluierung verdeutlichten einen Anstieg der Verkehrskapazität mit steigender Durchdringungsrate für beide Netzwerke. Mit ausschließlich automatisierten Fahrzeugen wurde eine Steigerung von ca. 16 % erzielt.

Neben dem Fahrzeugfolgmodell von Krauss (1998) gehört das Intelligent Driver Modell (IDM) von Treiber & Kesting (2000) zu den häufig verwendeten Modellen, da das IDM in Relation zu anderen Fahrzeugfolgmodellen eine geringere Abweichung zum gewünschten Fahrverhalten aufweist (Kanagaraj et al. (2013); Zhu et al. (2018)). Hinsichtlich der Parametrisierung des automatisierten Fahrverhaltens mittels IDM haben eine Vielzahl an Studien theoretische Annahmen, ohne die Berücksichtigung empirischer Daten, getroffen (Talebpour und Mahmassani (2016); Wang et al. (2018); Pariota et al. (2020); Zhong et al. (2020)). Zu den relevanten Parametern gehören hauptsächlich die zeitlichen Abstände, wobei angenommen wurde, dass mit steigendem Automatisierungsgrad geringere zeitliche Abstände realisierbar sind. Um hingegen ein möglichst realitätsnahes Fahrverhalten zu erreichen, wurde von Treiber und Kesting (2013) eine Methodik vorgestellt, bei der Trajektorien aus Floating Car Data (FCD) verwendet wurden. Bei der Kalibrierung des Fahrzeugfolgmodells wurden zwei unterschiedliche Varianten vorgestellt. Die erste Variante nutzt den räumlichen Abstand als Regelgröße, wohingegen bei der zweiten Variante Beschleunigungs- bzw. Geschwindigkeitsprofile verwendet werden. Je nach Datengrundlage eignen sich beide Varianten gleichermaßen für die datenbasierte Kalibrierung von Fahrzeugfolgmodellen.

Basierend der Literaturanalyse stellt sich heraus, dass für folgende Punkte weiterer Forschungsbedarf besteht:

- Die simulative Untersuchung wurde bisher auf klein skalierten Verkehrsnetzen durchgeführt. Zudem ging aus den Arbeiten nicht hervor, inwiefern ein realitätsnahes Verkehrsnachfragemodell berücksichtigt wurde.
- Aufgrund des Mangels an verfügbaren empirischen Daten aus automatisierten Fahrten basiert die Kalibrierung in Verkehrsflusssimulationen ausschließlich auf theoretischen Annahmen. Die realitätsnahe Kalibrierung des Fahrzeugfolgmodells ist für die Untersuchung der Verkehrsqualität ausschlaggebend, da zu erwarten ist, dass mit steigender Skalierung des Untersuchungsnetzes der Einfluss der Fahrzeugfolgmodelle ebenfalls zunimmt.

2.5 Das Konzept des objektiven Risikos im städtischen Verkehr

Gemäß der ISO-Norm 31000:2018 lässt sich eine Quantifizierung des objektiven Risikos mit Hilfe des Produkts aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß vornehmen. Dementsprechend wird in wissenschaftlichen Arbeiten zur Risikomodellierung, unabhängig vom behandelten Anwendungsfall, häufig mindestens einer dieser Faktoren modelliert.

In Bezug auf den Straßenverkehr wird dabei der Schadensfall üblicherweise als Kollision, also eine gegenseitige ungeplante Berührung mindestens zweier Verkehrsteilnehmer, definiert. Grundlage der Berechnung einer Eintrittswahrscheinlichkeit ist unter dieser Voraussetzung somit zunächst eine Bewegungsprädiktion aller Verkehrsteilnehmer, wie sie bspw. von Xie (2017) für Kraftfahrzeuge oder von Rehder (2018) für Fußgänger vorgenommen wurde. Nach Schreier (2016) lässt sich durch Überlagerung von Aufenthaltswahrscheinlichkeiten eine Kollisionsprädiktion durchführen.

Bei der Formulierung des Schadensausmaßes besteht die größte Herausforderung darin, die große Bandbreite von möglichen Unfallfolgen, die von leichten Sachschäden bis hin zu schwersten Personenschäden reicht, in einem gemeinsamen Maß zu quantifizieren. Eine Methode hierzu besteht in der Zuordnung monetärer Kosten zur Verletzungsschwere (Kramer 2009). Die erwartete Schwere sowohl von Sach- als auch Personenschäden lässt sich mit Hilfe physikalischer Modellierungsansätze abschätzen, die etwa Geschwindigkeits- oder Massedifferenzen einer prädierten Kollision verwenden (vgl. Ottensmeyer (1985), Otte (1998), Johannsen (2013)).

In Bezug auf AFiM müssen somit die bestehenden Ansätze zur Formulierung eines objektiven Risikomaßes auf die Anwendbarkeit im Stadtverkehr überprüft und ggf. angepasst und erweitert werden. Anschließend muss eine sinnvolle Skala ermittelt werden, um das Risiko in den zu erwartenden Situationen und Geschwindigkeiten bewerten zu können.

3 Neuheitsgrad, Fortschritt gegenüber dem Stand der Wissenschaft und Technik

3.1 Gestaltung automatisierter Fahrfunktionen im städtischen Bereich unter Berücksichtigung des erlebten Risikos (TUBS)

Wie oben dargestellt, sind dem Konsortium bisher keine Fahrfunktionen bekannt, die variabel das Risiko, das sie durch ihr Fahren erzeugen, adaptieren können. Auch Untersuchungen zu Metriken für das Risiko und zu Grenzkrisen im Straßenverkehr sind nicht bekannt. Offen ist weiter, welches Ausmaß an erlebtem Risiko für Menschen in Interaktion mit hochautomatisierten Fahrzeugen akzeptabel ist.

Für automatisierte Fahrzeuge wurde im Fahrsimulator des IV und dem VIL des IfR untersucht, wie sich das Fahrverhalten hochautomatisierter Fahrzeuge auf das erlebte Risiko der Mitfahrer und der anderen Verkehrsteilnehmer, vor allem Fußgänger und Radfahrer, auswirkt. Davon ausgehend konnte dann die Auslegung der Fahrfunktion in den entsprechenden Szenarien so angepasst werden, dass das akzeptable erlebte Risiko sowohl für Mitfahrer als auch Radfahrer und Fußgänger nicht überschritten wird.

Als Grundlage für diese Anpassung wurde die Fahrfunktion des IfR aus dem Projekt Stadtpilot verwendet. Im Projekt Stadtpilot wird der Versuchsträger Leonie seit 2010 im öffentlichen Straßenverkehr in Braunschweig betrieben. Aus der langjährigen Forschung mit dem Versuchsträger und den aus dem Projekt hervorgegangenen Ergebnissen stand für das Projekt AFiM eine sehr gute Grundlage bereit. Zur Reduktion der Herausforderung der Simulation der Fahrfunktion für das Projekt AFiM wurden die Umfeldwahrnehmung und die Lokalisierung innerhalb der digitalen Karte vereinfacht simuliert, um den Fokus auf die Fahrentscheidungen und das damit verbundene Risiko zu legen. Hierdurch wurde die Bestimmung der eigenen Position in der Welt und der Position und Dynamik anderer Verkehrsteilnehmer ohne Berücksichtigung von Unsicherheiten simuliert. Dies stellte natürlich eine deutliche Vereinfachung gegenüber dem realen Betrieb eines automatisierten Fahrzeugs dar. Allerdings waren für beide Herausforderungen noch keine allgemein verfügbaren technischen Lösungen vorhanden. Durch diese Simulation konnte auch ohne diese Lösungen erreicht werden, dass die gewählten Szenarien mit den entsprechenden Auslegungen der Funktionen des hochautomatisierten Fahrzeugs dennoch dargestellt werden konnten, um die eigentlichen Ziele des Projekts AFiM zu erreichen. Speziell in Grenzzuständen konnten so verschiedene Auslegungen und damit Risikograde besser miteinander verglichen werden.

Im Rahmen des Projekts AFiM wurde die Software dahingehend erweitert, dass basierend auf der funktionalen Systemarchitektur an verschiedenen Stellen im System eine Variation der Auslegung und damit des Risikos möglich wurde. Hierzu zählen beispielsweise Sicherheitsabstände, Bremszeitpunkte, Bremsstärken, lateraler Versatz und die gefahrene Geschwindigkeit.

Im Fahrsimulator des IV wurde dann diese Fahrfunktion und die entsprechenden Szenarien nachgebildet, um in verschiedenen relevanten Szenarien den Zusammenhang zwischen der Auslegung und dem erlebten Risiko untersuchen zu können. Dabei konnten Probanden entweder selbst die Auslegung gezielt beeinflussen, um so eine Auslegung zu finden, die für sie ein akzeptables Risiko darstellt. Außerdem konnten gezielt verschiedene Variationen der Auslegung im Hinblick auf das erlebte Risiko untersucht werden. Neben dem Fahrsimulator wurden hierzu auch online-Studien eingesetzt. Auf diese Weise konnte gezeigt werden, welche Auslegungen automatisierter Fahrfunktionen

sowohl für Mitfahrer als auch für Radfahrer und Fußgänger in den gewählten prototypischen Szenarien akzeptabel sind.

Das VIL-Fahrzeug wurde dann genutzt, um ausgewählte Varianten der Szenarien auf einem Testgelände erlebbar zu gestalten. Das VIL-Fahrzeug bietet die Möglichkeit, dies gefahrlos in einem echten Fahrzeug mit virtueller Umgebung durchzuführen. Die Fahrversuche zeigten, wie sich die Variation der Auslegungen und damit des erlebten Risikos im Realfahrzeug anfühlt. Im Fokus stand hierbei, wie eine Person im Fahrzeug eine Situation wahrnimmt (Innensicht). Diese nahm auf dem Fahrersitz des VIL-Fahrzeugs Platz und hatte die Möglichkeit, einen Konfliktfall realitätsnah zu bewerten, ohne dass sie oder andere Personen gefährdet werden. Im Vergleich zu Software-in-the-Loop (SIL) oder stationären Simulatoren wird so eine realitätsgetreuere Empfindung des Risikos möglich. Im Rahmen des Projekts konnte so eine Validierung der im Fahr Simulator des IV gewonnenen Erkenntnisse durchgeführt werden, indem ein Teil der im Simulator untersuchten Szenarien im VIL nachgebildet wurde.

3.2 Erweiterung von Simulationsmodellen um Interaktionen mit Fußgängern und Radfahrern mit automatisierten Fahrzeugen (TUBS & LUH)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bisherige Arbeiten automatisierte Fahrzeuge gemeinsam mit anderen Fahrzeugen betrachten. Demgegenüber erweitert das Projekt AFiM diese Sichtweise, indem sowohl motorisierte Verkehrsteilnehmer als auch Fußgänger und Radfahrer in einem gemeinsamen Straßenraum betrachtet werden. Zwar wurden menschliche Interaktionen auf der Grundlage von Beobachtungen bereits simuliert, allerdings ohne automatisierte Fahrzeuge zu berücksichtigen.

Das Novum liegt also in der Kombination der Simulation automatisierter Fahrzeuge mit der Mischverkehrssimulation. Dabei besteht die Herausforderung darin, das erwartete Verhalten der schwachen Verkehrsteilnehmer gegenüber automatisierten Fahrzeugen zu modellieren, um die Auswirkungen automatisierten Fahrens auf die Systemleistungsfähigkeit untersuchen zu können.

Im Straßenverkehr gibt es zahlreiche Szenarien, in denen konventionelle und automatisierte Fahrzeuge, Fußgänger und Radfahrer miteinander interagieren. Als Grundlage für das Projekt AFiM wurden basierend auf den Erfahrungen der Projektpartner relevante Szenarien mit Mischverkehr im urbanen Raum identifiziert und untersucht. Dies wurde durch eine Aufzeichnung von Realdaten an ausgewählten Knotenpunkten und Querungen sowie einer Auswertung dieser möglich. Die Aufzeichnung erfolgte hierbei sowohl durch Verkehrsbeobachtung, z.B. durch Videoaufzeichnungen, als auch durch Aufzeichnungen aus einem automatisierten Fahrzeug heraus. Hierfür eignete sich der Referenzsensorik-Prüfstand des IfR, der aus einem Messfahrzeug und einem Stand-Laserscanner besteht. Im vom BMVI geförderten Projekt "Digitaler Knotenpunkt 4.0" wurden ähnliche Messfahrten auf der so genannten Forschungskreuzung in Braunschweig durchgeführt. Die dabei gewonnenen Daten konnten in diesem Projekt mit geringem Anpassungsaufwand genutzt werden. Für dieses Projekt wurden Fahrten an weiteren Knotenpunkten durchgeführt, um eine Variation der Szenarien zu ermöglichen.

Außerdem wurden die Ergebnisse von Befragungsstudien aus dem BMBF-Projekt KOLA (Kooperativer Laserscheinwerfer, IV) genutzt, bei denen systematisch Konfliktsituationen

mit positiven und negativen Lösungen im Verkehr erhoben wurden. Dies lieferte die Basis für die Definition relevanter, städtischer Szenarien.

Die gewählten Szenarien wurden in der vorhandenen Simulationsumgebung MODIS (siehe Kurzdarstellung des Projektkonsortiums) modelliert. Im Gegensatz zu gängiger Simulationssoftware aus dem Bereich Verkehrssimulation wird hier ein Ansatz auf der Grundlage von Konfliktlösungsstrategien verfolgt. Validierungen an aufgezeichneten Realdaten von verschiedenen Knotenpunkten haben gezeigt, dass dieser Ansatz insbesondere für die Modellierung des Verhaltens schwacher Verkehrsteilnehmer in Konfliktsituationen mit motorisierten Verkehrsteilnehmern sehr gut geeignet ist. Dem Projektkonsortium ist kein weiterer Modellansatz bekannt, mit dem die Abbildung des Verkehrsablaufs auf Mischverkehrsflächen auf mikroskopischer Ebene in einer vergleichbaren Qualität möglich ist.

3.3 Modellierung einer großflächigen Verkehrsflusssimulation mit automatisiertem Mischverkehr (TUBS)

Durch die Einführung automatisierter Fahrzeuge in das städtische Umfeld bzw. den Stadtverkehr wird eine deutliche Auswirkung auf die Verkehrsqualität in den bestehenden Straßennetzen erwartet. In innerstädtischen Verkehrsnetzen, wo eine sichere und auch leistungsfähige Koexistenz zwischen konventionellen und vollautomatisierten Fahrzeugen angestrebt wird, hängt die Verkehrsqualität maßgeblich vom Fahrverhalten der automatisierten Fahrzeuge ab.

Um eine Aussage über die Leistungsfähigkeit des Verkehrsablaufs treffen zu können, wurden Indikatoren zur Bewertung von innerstädtischen Verkehrsnetzen ermittelt, bei denen Aspekte der Verkehrsqualität wie Kapazität oder Verlustzeit berücksichtigt wurden.

Durch den Vergleich verschiedener Risikograde von automatisierten Fahrzeugen wird durch die Simulation des Verkehrsablaufs der Zusammenhang zwischen Risiko und Systemqualität untersucht. Dies wird erreicht, indem die Indikatoren für die Leistungsfähigkeit bestehender Szenarien für unterschiedliche Risikograde bei Variation der Durchdringungsraten ausgewertet werden.

Als Grundlage der Untersuchung dient der Stadtteil Hannover-List, der unter Verwendung von realen Detektordaten in einer mikroskopischen Simulationsumgebung kalibriert und validiert wurde. Die Simulation bildet hierbei einen herkömmlichen Werktag für 24 Stunden ab. Durch die Adaption der charakteristischen Verkehrsmuster werden sowohl Verkehrszustände bei geringer Dichte als auch bei hohem Verkehrsaufkommen mitberücksichtigt.

Die Parametrisierung sowohl der konventionellen als auch der automatisierten Fahrzeuge beruht auf empirischen Daten, um auch hierbei möglichst realitätsnahe Gegebenheiten zu schaffen. Die makroskopische Kalibrierung erfolgte anhand der Wahrscheinlichkeit von absoluten Beschleunigungswerten, die während Testfahrten von Versuchsträgern aufgezeichnet wurden. Die mikroskopische Modellierung erfolgte u.a. durch das Befahren von exemplarischen Streckenteilen des Realnetzwerks.

Neben der Analyse auf Grundlage bestehender empirischer Daten wurden unterschiedliche Risikograde, die sich hinsichtlich Geschwindigkeit sowie den Abständen zu vorausfahrenden Fahrzeugen unterscheiden, simuliert. Die Ergebnisse aus der Simulation werden neben der Ermittlung der Verkehrsqualität genutzt, um die Korrelation

zwischen den mikroskopischen Kennwerten der automatisierten Fahrzeuge und den Aspekten der Verkehrsqualität zu ermitteln.

4 Methodische Grundlagen für die Untersuchungen

4.1 Auswahl relevanter Szenarien und Interaktionen (TUBS)

Für die Auswahl geeigneter Szenarien in den Fahrsimulationen wurden Interaktionssituationen zwischen Verkehrsteilnehmern im Straßenverkehr aus vorangegangenen Forschungsprojekten re-analysiert, um relevante Interaktionssituationen zwischen Mitfahrern im automatisierten Fahrzeug und schwächeren Verkehrsteilnehmern (Fußgänger, Radfahrer) im urbanen Straßenverkehr zu identifizieren. Der Fokus lag hierbei sowohl auf dem Risiko- bzw. Sicherheitserleben aus der Innensicht menschlicher Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug als auch aus der Außensicht von Fußgängern und Radfahrern. Die Ergebnisse der Analyse dienten als Diskussionsgrundlage zur Auswahl geeigneter Interaktionssituationen im Projektkonsortium. Weiterhin dienten die im Rahmen der Literaturrecherche gewonnenen Erkenntnisse als Grundlage für die in den folgenden Arbeitspaketen durchgeführten Simulations- und Probandenstudien.

Den Ausgangspunkt bildete die Analyse typischer Interaktionen zwischen menschlichen Fahrern und schwächeren Verkehrsteilnehmern, wie sie im heutigen innerstädtischen Verkehr anzutreffen sind. Dabei lag der Fokus auf dyadischen Interaktionen zwischen einem schwächeren Verkehrsteilnehmer und einem Fahrzeug. Zudem ist zu beachten, dass die Interaktionen in beiden im Folgenden kurz dargestellten Forschungsprojekten aus der Innensicht eines menschlichen Fahrers untersucht wurde, welcher das Fahrzeug selbst steuert.

Im Rahmen des BMWi Projekts „UR:BAN – Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement“ untersuchten Winkler et al. (2018) eine Vielzahl an Interaktionssituationen von Kraftfahrern mit schwächeren Verkehrsteilnehmern in der Stadt. Die Auswahl der Fahrscenarien basierte auf den Unfallstatistiken des Statistischen Bundesamtes sowie auf vorangegangenen Studien. Für das AFiM-Projekt waren fünf Szenarien grundsätzlich relevant, da diese jeweils eine dyadische Interaktion eines Fahrzeugs mit einem schwächeren Verkehrsteilnehmer beinhalten, und zwar beim Rechtsabbiegen oder Linksabbiegen an einem Knotenpunkt bzw. auf gerader Strecke. Letzteres Fahrscenario beinhaltet eine Sichtverdeckung des Fußgängers durch parkende Fahrzeuge auf dem seitlichen Parkstand, was im innerstädtischen Bereich häufig zu beobachten ist. In dieser Situation konnte der Fußgänger möglicherweise unerwartet die Straße queren, was gerade bei Sichtverdeckungen zu kritischen Situationen führen könnte.

Eine weitere Fahrsimulatorstudie untersuchte den Einfluss der Verkehrsdichte und die Präsenz von Fußgängern an einer Einmündung auf den Aufmerksamkeitsfokus und das Fahrverhalten menschlicher Fahrer (Werneke & Vollrath, 2012). Im diesem Fahrscenario fuhr ein Fahrer auf eine Einmündung zu. Hier musste die Vorfahrt gewährt werden, da sich ein oder mehrere Fahrzeuge von links näherten. Variiert wurden die Menge der von links kommenden Fahrzeugen (= Verkehrsdichte) und die Präsenz einer Fußgängerinfrastruktur in Form eines Zebrastreifens auf der rechten Seite. Die Kraftfahrer mussten ihre Aufmerksamkeit entsprechend auf den Verkehr auf der linken Seite und / oder auf den Zebrastreifen auf der rechten Seite richten, um eine sicherheitskritische Situation mit anderen Fahrzeugen und / oder Fußgänger zu vermeiden.

Im Hinblick auf das vorliegende Forschungsvorhaben ist die Untersuchung von Interaktionen am Zebrastreifen allerdings weniger von Interesse, da Interaktionen

zwischen Fußgängern und Fahrzeugen am Zebrastreifen bereits heute im konventionellen Straßenverkehr klar geregelt sind. Diese Regelungen werden sich auch mit der Einführung hochautomatisierter Systeme nicht verändern. Somit bietet diese Situation wenig Spielraum für die technische Auslegung einer automatisierten Fahrfunktion. Ebenso ist diese Situation aus der Sicht des Fußgängers eindeutig, denn dieser weiß, dass das Fahrzeug halten muss. Davon ausgehend sind eher Interaktionen von Interesse, welche eine gewisse Unvorhersehbarkeit aus Sicht des Fahrverhaltens aus der Außensicht schwächerer Verkehrsteilnehmer beinhalten.

Auf Grundlage dieser vorangegangenen Forschungsprojekte wurden zwei Workshops im Projektkonsortium durchgeführt, in denen diskutiert und entschieden wurde, welche Fahrszenarien im Rahmen des Forschungsprojekts zu untersuchen sind. Dabei wurde entschieden, dass die Fahrszenarien sowohl eine Untersuchung der Innenperspektive von Mitfahrern im automatisierten Fahrzeug als auch der Außenperspektive schwächerer Verkehrsteilnehmer ermöglichen sollen.

Nach intensiver Diskussion ergaben sich drei innerstädtische Fahrszenarien, deren Untersuchung vom Projektkonsortium als relevant für das Forschungsprojekt erachtet wurden:

- Das Fahren auf einer geraden Hauptstraße mit variierender Infrastruktur und Fußgängerpräsenz (siehe Abbildung 1).
- Einmündungsszenario, in dem das automatisierte Fahrzeug die Vorfahrt achten muss und einem schwächeren Verkehrsteilnehmer begegnet (siehe Abbildung 2).
- Knotenpunkte mit Lichtsignalanlagen

Die in den folgenden Abschnitten beschriebenen innerstädtischen Knotenpunkte sind Knotenpunkte im Stadtgebiet Braunschweig nachempfunden.

4.1.1 Gerade Hauptstraße

Als erste Interaktionssituation wurde eine gerade Hauptstraße mit seitlichem Parkstreifen ausgewählt. Auf dem Parkstreifen wurde die Fußgängerpräsenz variiert.

Somit ermöglicht dieses Fahrszenario eine grundlegende Untersuchung von automatisierten Fahrverhaltensweisen und infrastrukturellen Merkmalen, die das erlebte Risiko von Mitfahrern im automatisierten Fahrzeug beeinflussen.

Zusätzlich zu den variierenden Fahrparametern der automatisierten Fahrfunktion sollte im Interesse des Instituts für Verkehr und Stadtbauwesen (IVS; TU Braunschweig) auch geklärt werden, welchen Einfluss straßenbauliche Begebenheiten auf das erlebte Risiko des Mitfahrers nehmen. Es wurden deshalb auch die baulichen Gegebenheiten des geraden Streckenabschnitts diskutiert, wobei sich die Infrastruktur von innerstädtischen Straßen im Wesentlichen zwischen zwei Straßentypen unterscheidet:

1. Eine Hauptstraße mit zwei Fahrstreifen in jede Richtung („Hagenring“ in Braunschweig, siehe Abbildung 1 links).
2. Eine Hauptstraße mit einem Fahrstreifen in jede Richtung („Kastanienallee“ in Braunschweig, siehe Abbildung 1 rechts).



Abbildung 1: Links: Satellitenbild eines Abschnitts des Hagenrings mit zwei Fahrstreifen in jede Fahrtrichtung in Braunschweig (Quelle: Google Maps). Rechts: Satellitenbild eines Abschnitts des Bültenwegs mit einem Fahrstreifen in jede Fahrtrichtung in Braunschweig (Quelle: Google Maps).

In der Diskussion legte das Konsortium fest, die Hauptstraße mit einem Fahrstreifen pro Fahrtrichtung zu untersuchen. Analog zu Winkler et al. (2018) wurde im gewählten Fahrscenario eine Sichtverdeckung als Merkmal der Infrastruktur berücksichtigt. Bei einer Sichtverdeckung durch ein parkendes Fahrzeug auf dem rechten Parkstreifen muss das automatisierte Fahrzeug das Risiko berechnen, dass aus dem verdeckten Bereich plötzlich ein Hindernis hervorkommt (z.B. ein schwächerer Verkehrsteilnehmer, welcher die Straßen queren möchte oder zu seinem Fahrzeug möchte). Insofern ist das ausgewählte Fahrscenario sowohl für die Analyse des subjektiven als auch des objektiven Risikos gleichermaßen geeignet.

4.1.2 Einmündung

Das zweite Fahrscenario ist eine Einmündung, welche der Einmündung „Schunterstraße“ x „Hagenring“ in Braunschweig nachempfunden ist (siehe Abbildung 2). In diesem Szenario fährt ein automatisiertes Fahrzeug aus der Nebenstraße und möchte auf die Hauptstraße einbiegen. Dazu muss das automatisierte Fahrzeug an der Einmündung sowohl dem kreuzenden Verkehr auf der Hauptstraße als auch den kreuzenden Fußgängern und Radfahrern Vorfahrt gewähren. Dieses Fahrscenario wurde für die Untersuchung der Innen- und Außenperspektive von Verkehrsteilnehmern als relevant erachtet, weil ein automatisiertes Fahrzeug in dieser Situation zwar die Vorfahrt achten muss, es aber keine verbindlichen Verhaltensvorschriften wie z.B. bei einem Stopp-Schild, einer Lichtsignalanlage oder einem Zebrastreifen gibt. Anders als bei den eindeutig geregelten Situationen kann ein schwächerer Verkehrsteilnehmer bei einem „Vorfahrt achten!“ Schild nicht automatisch davon ausgehen, dass ihm diese vom heranfahrenden Fahrzeug auch gewährt wird. Aufgrund dieses Rests an Unsicherheit ist es aus psychologischer Sicht relevant zu untersuchen, wie das Fahrverhalten eines automatisierten Fahrzeugs in dieser Verkehrssituation auf die beteiligten menschlichen Verkehrsteilnehmer wirkt. Dabei sind Innensicht eines Mitfahrers und die Außensicht schwächerer Verkehrsteilnehmer gleichermaßen relevant.

Die Verkehrssituation ist aber nicht nur seitens eines menschlichen Verkehrsteilnehmers unsicher. Ein automatisiertes Fahrzeug muss im Sinne eines effizienten Vorankommens seiner Mitfahrer und der anderen Verkehrsteilnehmer früher oder später weiterfahren. Trotz der vielen Eingangsgrößen, die diese Entscheidung zur Weiterfahrt absichern, ist

die Entscheidung doch immer mit einem Restrisiko verbunden, da jeder Interaktion im Straßenverkehr ein inhärentes Risiko anhaftet (siehe Markkula et al., 2020).



**Abbildung 2: Satellitenbild der Einmündung Schunterstraße x Hagenring in Braunschweig
(Quelle: Google Maps)**

4.1.3 Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage

Komplexere Knotenpunkte mit Lichtsignalanlagen stellen laut Literatur eine Verkehrssituation dar, an der es relativ zu anderen Stellen im Stadtverkehr häufig zu schweren Verkehrsunfällen kommt (Winkler et al., 2018). Deshalb erscheint es grundsätzlich sinnvoll, im Kontext des Projekts Knotenpunkte zu untersuchen, denn hier wird eine sichere Fahrweise automatisierter Fahrzeuge in der Interaktion mit schwächeren Verkehrsteilnehmern eine besonders wichtige Rolle spielen. Vor allem das sogenannte „bedingt verträgliche“ Links- und Rechtsabbiegen durch den fließenden Gegenverkehr bei gleichzeitiger Grünphase für Fahrradfahrer und Fußgänger wird voraussichtlich eine technische Herausforderung für automatisierte Fahrfunktion darstellen. Gerade an diesen komplexen Knotenpunkten müssen viele verschiedene Parameter in die Verhaltensabwägung automatisierter Fahrzeuge einbezogen werden. Aufgrund der Vielzahl an Parametern, die für ein solches Szenario in einer Fahrsimulation abzuschätzen wären (z.B. mit welchem Radius biegt ein automatisiertes Fahrzeug ab? Welche Lücken wählt es, um durch den fließenden Gegenverkehr abzubiegen? Wo auf der Kreuzung hält es an, um den Gegenverkehr durchzulassen?), wurde dieses Fahrscenario von der Untersuchung ausgeschlossen.

4.1.4 Zusammenfassung

Entsprechend der oben beschriebenen Überlegungen wurden für die empirischen Untersuchungen zwei grundlegende Situationen ausgewählt:

- Gerade Straßenabschnitte mit möglicher Präsenz von Fußgängern, bei denen das automatisierte Fahrzeug das Fahrverhalten anpassen sollte, um auf ein mögliches plötzliches Queren eines Fußgängers adäquat reagieren zu können.
- Einmündungen mit Vorfahrt gewähren, bei denen sich ein automatisiertes Fahrzeug nähert, das schwächeren Verkehrsteilnehmern (Radfahrern, Fußgängern) ein Überqueren ermöglichen sollte.

4.2 Umsetzung von ausgewählten Szenarien – Fahrfunktion, Fahrsimulation und Verkehrssimulation (TUBS & LUH)

4.2.1 Fahrfunktion und Verkehrssimulation (TUBS & LUH)

Die Fahrfunktion, die am IfR implementiert wurde, wird in ADTF ausgeführt. Um die gewählten Szenarien in der Simulationsumgebung Virtual Test Drive (VTD) der Firma VIRES Simulationstechnologie GmbH durchzuführen, wurde ADTF mit VTD gekoppelt. Dadurch kann das Ego-Fahrzeug in der Simulation durch die implementierte Fahrfunktion beeinflusst werden. Zur Anbindung von MODIS an die Fahrfunktion hat es sich als bester Weg erwiesen, MODIS auch mit VTD zu koppeln.

VTD stellt als öffentliche Schnittstelle den sog. Runtime Data Bus (RDB) zur Verfügung. Diese Schnittstelle ist bidirektional, das heißt, alle benötigten Simulationsdaten können in jedem Zeitschritt sowohl ausgegeben wie auch eingelesen werden. Dazu verwendet RDB ein VTD-eigenes Format, bei dem Bytecode über einen TCP-Port gesendet wird.

In MODIS wurde eine entsprechende Schnittstelle entwickelt. Eine Herausforderung stellte dabei die Synchronisation dar. Da ADTF es nicht ermöglicht, dass die Zeitschritte aller drei Modelle voneinander abhängig laufen, ist ADTF mit VTD synchronisiert und die Kommunikation mit MODIS läuft asynchron. Um den Ablauf in Echtzeit oder schneller zu gewährleisten, wurden auch Latenzzeiten zwischen Simulationsumgebungen in Braunschweig und Hannover berücksichtigt.

Die Kopplung von MODIS, VTD und ADTF wurde mit verschiedenen Verkehrsteilnehmern getestet und validiert.

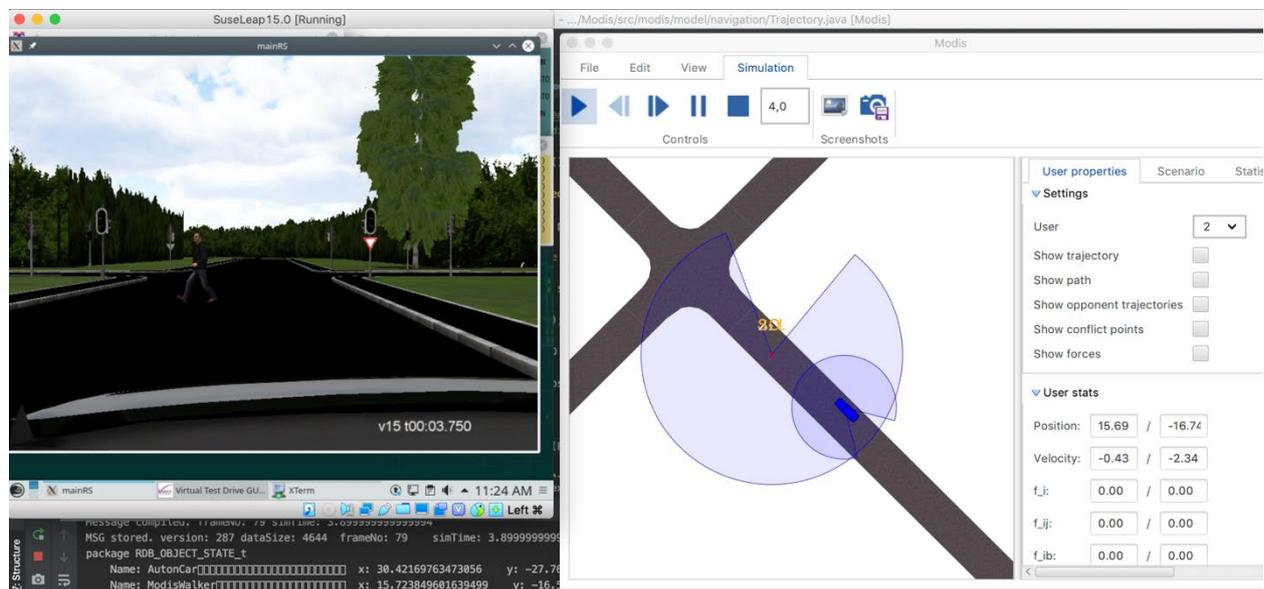


Abbildung 3: Graphische Darstellung desselben Szenarios in VTD (links) und MODIS (rechts)

Abbildung 3 zeigt das Ergebnis der Kopplung der beiden Programme: In beiden graphischen Oberflächen (VTD links, MODIS rechts) wird gleichzeitig dasselbe Szenario simuliert. In VTD wird das Szenario aus Sicht des PKW-Fahrers demonstriert, wohingegen in MODIS die Vogelperspektive verwendet wird. Im Sichtfeld des Fahrers in VTD befindet sich im vorderen linken Bereich ein Fußgänger, welcher aktuell die Straße

überquert. In MODIS ist das Fahrzeug unten rechts in blau und der Fußgänger weiter links in rot dargestellt.

Die Fahrfunktion (und deren Verhalten) wurde via VTD in MODIS eingebunden und musste somit nicht separat modelliert werden.

Das Verhalten von Fußgängern und Radfahrern gegenüber motorisierten Fahrzeugen wurde präzisiert. Dazu wurden die ausgewählten Szenarien in MODIS modelliert und die aus den Videodaten extrahierten Trajektorien zur Justierung und Validierung der Verhaltensweisen von Verkehrsteilnehmern verwendet. MODIS wurde um das Konzept der eingeschränkten Wahrnehmung (Verdeckungen) erweitert.

In VTD wird das Umfeld für die Simulation im OpenDRIVE-Format beschrieben. Daher wurde für MODIS eine Schnittstelle entwickelt, die dieses Format einlesen kann, sodass MODIS und VTD im gleichen Umfeldmodell laufen. Dazu musste in MODIS ein entsprechendes Modell für die Fahrspuren implementiert werden.

4.2.2 Umsetzung im Fahrsimulator – Szenarien (TUBS)

4.2.2.1 Fahrsimulatoren

Experimentelle Fahrsimulatorstudien sind für die Untersuchung des erlebten Risikos menschlicher Verkehrsteilnehmer besonders geeignet, da Unterschiede im Erleben und Verhalten systematisch auf die Variation relevanter Einflussgrößen rückführbar sind (siehe Vollrath, & Krems, 2011). Somit ist es möglich, die Bedeutung einzelner Ausprägungen von Einflussgrößen für das erlebte Risiko menschlicher Verkehrsteilnehmer zu bestimmen. Des Weiteren ermöglichen Fahrsimulatorstudien die gefahrlose Untersuchung von Grenzbereichen des erlebten Risikos. So lassen sich im Fahrsimulator Fahrszenarien mit Fahrzeugtrajektorien und Umweltfaktoren darstellen, welche aus Sicherheitsgründen in der Realfahrt so nicht realisierbar sind (siehe Vollrath, & Krems, 2011). Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden zwei Fahrsimulatoren des Lehrstuhls für Ingenieur- und Verkehrspsychologie (TU Braunschweig) genutzt, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

Der statische Fahrzeugsimulator besteht aus einer Sitzkiste mit Fahrer- und Beifahrersitzen sowie Pedalerie. Der Rückspiegel wird als Rechteck auf die Frontleinvand projiziert. Zusätzlich steuert die Simulation die beiden Seitenspiegel rechts und links sowie das Kombiinstrument mit Geschwindigkeitsanzeige an. Die Szenerie wird mit drei Beamern auf drei Leinwände projiziert, die das Sichtfeld im Bereich von ca. 180° abdecken (siehe Abbildung 4). Die Probanden sitzen in einem Abstand von circa 2.1 m von der Leinwand entfernt. Ein Versuchsleiter überwacht die Fahrsimulatorfahrt auf sechs Computerbildschirmen in einem Nebenraum.



Abbildung 4: Statischer Fahrzeugsimulator des Lehrstuhls für Ingenieur- und Verkehrspsychologie der TU Braunschweig (Foto: Vanessa Stange).

Der Fahrradsimulator besteht aus einem Simulationsfahrrad, auf dem die Probanden durch eine Szenerie fahren (siehe). Die Szenerie wird auf sechs Bildschirmen in zwei Reihen direkt vor dem Simulationsfahrrad abgebildet. Die Fernsehbildschirme (je 1920 x 1080 Pixel, 50" Diagonale) präsentierten die simulierte Szenerie und decken einen Sichtbereich von etwa 180° ab.



Abbildung 5: Frontansicht mit sechs Bildschirmen und Fahrrad (Foto: Vanessa Stange).

Die Probanden bewegen sich in der Simulation durch Pedalbetätigung fort. Weiterhin ist die Nutzung der 21-Gang-Kettenschaltung wie bei einem echten Fahrrad möglich. Bremsen ist mittels Betätigung der auf der rechten Seite des Lenkers befestigten Handbremse möglich. Beim Rückwärtstreten ist das Fahrrad im Leerlauf. Diese grundlegenden Funktionen werden durch eine Aufhängung des Fahrrads realisiert. Eine Achse am Hinterrad hält dieses in circa 1 cm Höhe über dem Boden so, dass sich das Rad in der Luft mitdreht. Eine Walze sorgt für einen mit der Reibung des Rads auf dem Asphalt vergleichbaren Widerstand, durch die das Hinterrad geführt wird (siehe Abbildung 6). Die Walze wird durch die Radbewegung angetrieben.



Abbildung 6: Hinterradaufhängung mit Walze (Foto: Vanessa Stange).

Neben der Fahrradfahrerperspektive ist es möglich, die Fußgängerperspektive im Fahrradsimulator umzusetzen. Dazu stellen sich Fußgänger in einem Abstand von 1 m vor die Bildschirme. Die Szenerie wird analog zur Fahrradperspektive über die Bildschirme präsentiert. Eine Bewegung im Simulator ist für Fußgänger jedoch nicht möglich. Dies war jedoch für die Erfassung des erlebten Risikos in den dargestellten Szenarien auch nicht notwendig.

Zur Untersuchung des erlebten Risikos menschlicher Verkehrsteilnehmer im Mischverkehr wurden die ausgewählten Interaktionssituationen in den Fahrsimulatoren mittels der Simulationssoftware SILAB Version 6.0 (WIVW GmbH, <https://wivw.de/de>, siehe auch Krueger et al., 2005) implementiert. Dazu wurden zunächst die Fahrumgebung außerhalb des automatisierten Fahrzeugs, d.h. die Infrastruktur, umgesetzt.

Im Folgenden werden die beiden implementierten Fahrszenarien kurz beschrieben.

4.2.2.2 Szenario 1: Gerade Hauptstraße

Die untersuchte Hauptstraße im ersten Fahrszenario ist der Straße „Kastanienallee“ in Braunschweig nachempfunden. Pro Fahrtrichtung gibt es einen Fahrstreifen, welcher 3.25 m breit war (siehe Baier et al., 2006). Die beiden Fahrstreifen werden von einer Mittelmarkierung voneinander getrennt (siehe Baier et al., 2006). Am rechten und linken Fahrstreifen befinden sich jeweils 2.00 m breite Parkstände, welche teilweise voneinander durch Bäume getrennt sind. Neben den Parkständen links und rechts befinden sich Bürgersteige, auf denen Fußgänger laufen. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit in diesem Fahrszenario liegt bei maximal 50 km/h. Im Fahrsimulator wurde ein 600 m langes Teilstück der Hauptstraße implementiert.

In diesem Fahrszenario saßen die Probanden im automatisierten Fahrzeug und fuhren die Hauptstraße entlang (siehe Abbildung 7 links). Nach rund 130 m passierte das automatisierte Fahrzeug ein silbernes Fahrzeug, das sich auf dem rechten Parkstand befand (siehe Abbildung 7 rechts). Die Probanden wurden instruiert, das Fahrverhalten

des automatisierten Fahrzeugs sowie die Fahrumgebung außerhalb des Fahrzeugs zu beobachten. Ein Durchgang des Fahr Szenarios dauerte circa 30 s.

Die Umsetzung der automatisierten Fahrfunktion wird zusammen mit den Versuchsplänen der jeweiligen Probandenstudien näher erläutert (siehe Kapitel 4.2.3.4.1 & Kapitel 5.1.1.1), da die Variation der Fahrfunktion Bestandteil der Variation von Grenzzuständen war.



Abbildung 7: Implementiertes Fahr Szenario aus Mitfahrersicht im automatisierten Fahrzeug.

4.2.2.3 Szenario 2: Einmündung

Die in diesem Fahr Szenario untersuchte Einmündung ist der Einmündung „Hagenring“ x „Schunterstraße“ in Braunschweig nachempfunden. In diesem Szenario fährt ein automatisiertes Fahrzeug aus einer Nebenstraße auf die Einmündung zu einer Hauptstraße zu. Die Fahrbahn der Nebenstraße ist 6.50 m breit ohne Mittelmarkierung (siehe Baier et al., 2006). Zu den Seiten der Fahrbahn links und rechts befinden sich jeweils Bürgersteige. An der Einmündung kreuzt ein Radfahrer die Einmündung während das automatisierte Fahrzeug hier die Vorfahrt achten muss (siehe Abbildung 8). Im Fahr Simulator wurde ein 200 m langes Teilstück der Nebenstraße implementiert.

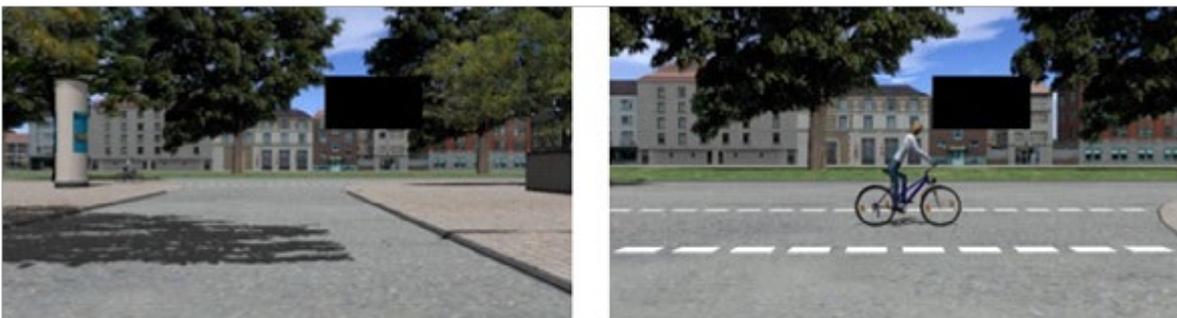


Abbildung 8: Innensicht eines Mitfahrers im automatisierten Fahrzeug auf das Einmündungsszenario.

Im Rahmen der Fahr Simulatorstudie zur Entwicklung und Validierung einer geeigneten Befragungsmethodik zur Erfassung des erlebten Risikos zeigte sich, dass der Bremszeitpunkt, an dem ein automatisiertes Fahrzeug die Bremsung einleitet, sich entscheidend auf das erlebte Risiko des Mitfahrers im Innern des Fahrzeugs auswirkt. Eine solche Messung dieses Bremszeitpunktbeginns setzt allerdings voraus, dass die Einmündung auch aus Sicht eines Mitfahrers im Fahrzeug gut einsehbar ist.

Aus diesem Grund wurde das Fahrscenario wie folgt angepasst:

Die Häuserreihen links und rechts der Nebenstraße wurden entfernt, und durch einen weitläufigen Park ersetzt. Ebenso wurden mögliche Sichtverdeckungen durch Litfasssäulen (siehe Abbildung 9 links) oder parkende Fahrzeuge entfernt. Das neue Fahrscenario ist in Abbildung 9 aus der Innensicht und in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aus der Außensicht dargestellt.

Aus der Innensicht startet das Fahrscenario 120 m vor der Haltelinie bei 30 km/h bzw. 210 m bei 50 km/h. Das automatisierte Fahrzeug beschleunigt zunächst von 0 km/h auf die Zielgeschwindigkeit von 30 km/h bzw. 50 km/h. Anschließend bremst das automatisierte Fahrzeug, um an der Haltelinie wieder zum Stehen zu kommen. Die Dauer der Anfahrt zur Einmündung ist entsprechend bei beiden Geschwindigkeiten identisch und lag bei rund 20 s pro Durchgang.



Abbildung 9: Einmündung aus der Innensicht im automatisierten Fahrzeug. Links: Heranfahrt an die Einmündung im automatisierten Fahrzeug. Rechts: Ein Radfahrer bzw. ein Fußgänger kreuzt die Einmündung.

Aus der Außensicht eines schwächeren Verkehrsteilnehmers ist die Dauer des Fahrscenarios abhängig davon, ob ein Fußgänger- oder ein Radfahrer sich der Einmündung nähert. Die Geschwindigkeit eines Radfahrers wurde mit 12 km/h umgesetzt. Als Gehgeschwindigkeit eines Fußgängers wurden 3 km/h implementiert. Entsprechend dauerte ein Durchgang rund 20 s.



Abbildung 10: Einmündung aus der Außensicht eines schwächeren Verkehrsteilnehmers. Links: Heranfahrt an die Einmündung. Rechts: Das automatisierte Fahrzeug hält an der Haltelinie, um dem schwächeren Verkehrsteilnehmer Vorfahrt zu gewähren.

Die Einflussgrößen, welche in diesem Fahrscenario variiert wurden, sind in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** näher erläutert. In diesem Arbeitspaket befindet sich auch eine detaillierte Beschreibung der Implementierung der

automatisierten Fahrfunktion unter Berücksichtigung der Innen- und Außensicht menschlicher Verkehrsteilnehmer.

4.2.3 Variation des Risikos in der Fahrfunktion (TUBS)

In den beschriebenen Szenarien sollte dann das Risiko durch entsprechende Auslegungen der Fahrfunktion variiert werden. Dafür wurden Parameter für die Fahrfunktion identifiziert und implementiert, die das objektive, von einem automatisierten Fahrzeug ausgehende Risiko beeinflussen. Die entsprechenden Auslegungen wurden dann für die Probandenstudie im VIL und für die Verkehrssimulation genutzt. Vergleichbare Auslegungen wurden in den Fahrsimulatorstudien verwendet.

4.2.3.1 Fahrfunktion

In der Probandenstudie im VIL und in der Simulationsstudie kam eine Fahrfunktion zum Einsatz, die aus einer Verhaltensentscheidung und einer Trajektorienplanung besteht (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Abbildung 11 rot eingerahmt). Basierend auf einem Umfeldmodell und einer Route aus der Navigation wird in der Verhaltensentscheidung zunächst ein auszuführendes Manöver berechnet. Darauf aufbauend wird eine Trajektorie geplant und ausgeführt.



Abbildung 11: Aufbau der Softwaremodule für die Fahrfunktion (rot) und der relevanten Eingangsgrößen eines automatisierten Fahrzeugs am Institut für Regelungstechnik.

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. Das Umfeldmodell repräsentiert die Umgebung und enthält unter anderem das Straßennetz, die umliegenden Verkehrsteilnehmer, Lichtsignalanlagen und die Informationen aus Verkehrsschildern. Eine genauere Beschreibung ist in Ulbrich (2015)¹ zu finden.

Basierend auf dem Umfeldmodell und der Route, der das automatisierte Fahrzeug folgen soll, werden im Anschluss im ersten Modul der Fahrfunktion (Verhaltensentscheidung) Manöverentscheidungen getroffen (z.B. „Fahrstreifen folgen“, „Fahrstreifen wechseln“ oder „Halten“). Aus dieser Manöverentscheidung wird eine Zielpose errechnet, die die Position, die Ausrichtung des Ego-Fahrzeugs an dieser Position und Dynamikdaten enthält. In Abbildung 12 ist die Zielpose als schwarzes Kreuz dargestellt, die Sollgeschwindigkeit wird über den Radius des Kreises visualisiert. Umso größer der Kreis, umso höher ist die Sollgeschwindigkeit. Außerdem wird ein Referenzpfad extrahiert (schwarz gestrichelte Linie), um die Berechnung der Trajektorien zu vereinfachen. Dieser Referenzpfad ergibt sich aus der Fahrstreifenmitte des zu befahrenden Fahrstreifens. Die Trajektorienplanung erzeugt dann aus den Daten der

¹ Ulbrich, S., et al. (2015). Defining and Substantiating the Terms Scene, Situation, and Scenario for Automated Driving. *IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*.

Verhaltensentscheidung eine Trajektorie, welche das Ego-Fahrzeug im Anschluss abfährt.



Abbildung 12: Errechnete Zielpose und Referenzpfad aus der Verhaltensentscheidung mit dem berechneten Manöver „Fahrstreifen folgen“

Die identifizierten Parameter wurden in die Verhaltensentscheidung implementiert und betreffen dadurch die Änderung der Zielpose und der Dynamikdaten (z.B. Geschwindigkeit). Eine Änderung der anderen Module wurde nicht vorgenommen, sodass auf das Umfeldmodell und die Trajektorienplanung nicht weiter eingegangen wird.

Im Folgenden werden die Parameter beschrieben, die für die Probandenstudie und die Simulationsstudie implementiert worden sind.

4.2.3.2 Probandenstudie im VIL

In der Probandenstudie wurde das subjektive Risikoerleben von Nutzern eines automatisierten Fahrzeugs untersucht. Eine vollständige Auflistung der Parameter und Anpassungen der Fahrfunktion sind nachfolgend aufgelistet:

- Geschwindigkeit
- Lateraler Abstand zur Fahrstreifenmitte
- Manöverwechsel in Abhängigkeit eines Haltewunsches
- Lineare Verzögerung auf einen definierten Haltepunkt

Es wurden zwei verschiedene Szenarien betrachtet. Diese sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** schematisch dargestellt.

Für das erste Szenario wurden die Abstände zur Fahrstreifenmitte variiert (vgl. Abbildung 13). So sollte das Fahrzeug einmal der Fahrstreifenmitte folgen, in den anderen Fällen einen Versatz zur Fahrstreifenmitte von 0.5 m nach links bzw. rechts aufbauen. Dafür wurde die Zielpose und der Referenzpfad rechts und links zur Fahrstreifenmitte versetzt. In Abbildung 13 ist diese Verschiebung schematisch dargestellt. Für das Ausweichen des Fahrzeugs wurden die relevanten Ausgangsgrößen der Verhaltensentscheidung verschoben (links: blau; rechts: orange), die Geschwindigkeit blieb konstant. Dadurch wurde die Trajektorie um diesen lateralen Versatz neben der Fahrstreifenmitte geplant und ausgeführt. Zudem konnte variiert werden, wann dieser laterale Versatz aufgebaut wurde. Dies war aber lediglich in der Vorbereitung der Probandenstudie relevant und wurde während der Studie nicht variiert.

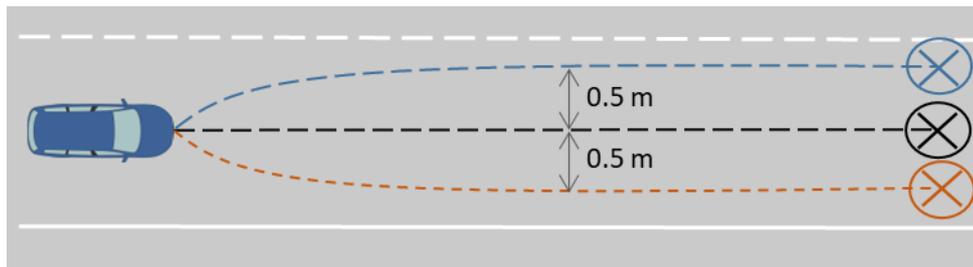


Abbildung 13: Implementierung eines lateralen Versatzes zur Fahrstreifenmitte für das erste Szenario der Probandenstudie.

Im zweiten Szenario wurde über die Kommunikation eines Haltewunsches auf einen vordefinierten Punkt verzögert. Die Verzögerung fiel dabei linear über die Distanz zu diesem Haltepunkt ab. Außerdem wurde die Geschwindigkeit variiert, die in den einzelnen Szenarien gefahren wurde.

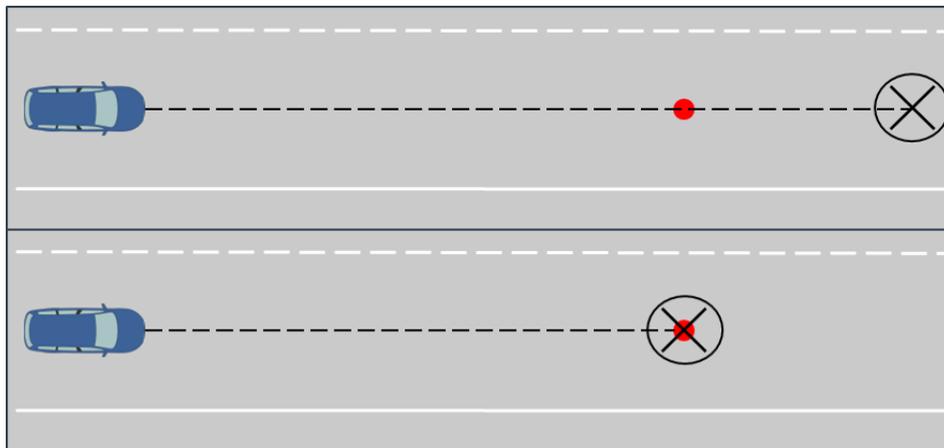


Abbildung 14: Errechnete Zielpose vor und nach der Kommunikation des Haltewunsches. Oben führt das Fahrzeug das Manöver „Fahrstreifen folgen“ aus, unten wird auf das Manöver „Halten“ gewechselt und die Zielpose auf den vordefinierten Haltepunkt gesetzt.

Zunächst wurde daher der Kommunikation des Haltewunsches ein Wechsel des Manövers „Fahrstreifen folgen“ auf das Manöver „Halten“ realisiert. In Abbildung 14 sind oben die Ausgangsgrößen der Verhaltensentscheidung vor der Kommunikation des Haltewunsches zu sehen, unten soll nach der Kommunikation des Haltewunsches auf den Haltepunkt verzögert und an diesem Punkt angehalten werden.

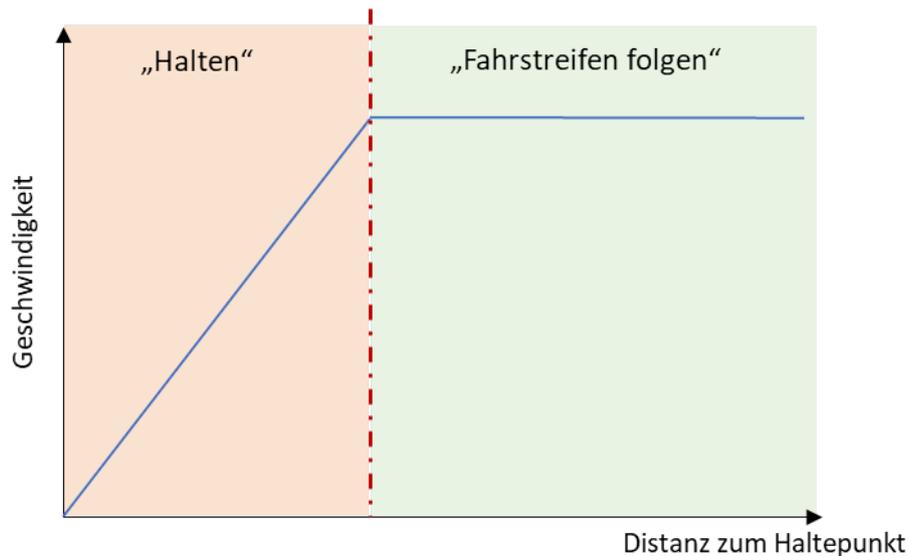


Abbildung 15: Schematischer Verlauf der Sollgeschwindigkeit vor und nach Kommunikation des Haltewunsches (rote Linie).

In Abbildung 15 ist der schematische Verlauf der Geschwindigkeit über die Distanz zum Haltepunkt dargestellt. Bei größerer Entfernung führt das Fahrzeug das Manöver „Fahrstreifen folgen“ aus (grüner Bereich). Nachdem der Haltewunsch kommuniziert wurde (rote Linie), wechselt das Manöver zu „Halten“ und das Fahrzeug baut die Geschwindigkeit linear bis zum Haltepunkt ab (roter Bereich).

In Abbildung 16 ist ein realer Verlauf des beschriebenen Vorgehens zu sehen. Die Fahrdaten wurden mit einem Fahrzeug des Instituts für Regelungstechnik aufgenommen. Zu Anfang wurde auf die Geschwindigkeit von 8.3 m/s (30 km/h) beschleunigt (blau) und diese so lange beibehalten, bis ein Haltewunsch kommuniziert wurde (rot). Das Fahrzeug verzögerte anschließend bis zum Haltepunkt in den Stillstand. Eine geringe Latenz zwischen Haltewunsch und Abbau der Geschwindigkeit ergab sich aus der Zeit, in der eine neue Trajektorie berechnet und ausgeführt wurde. Zusätzlich weist ein reales Fahrzeug durch sein Gewicht eine Trägheit auf, sodass in Realität die Änderung der Fahrzeugbewegung etwas Zeit kostet.

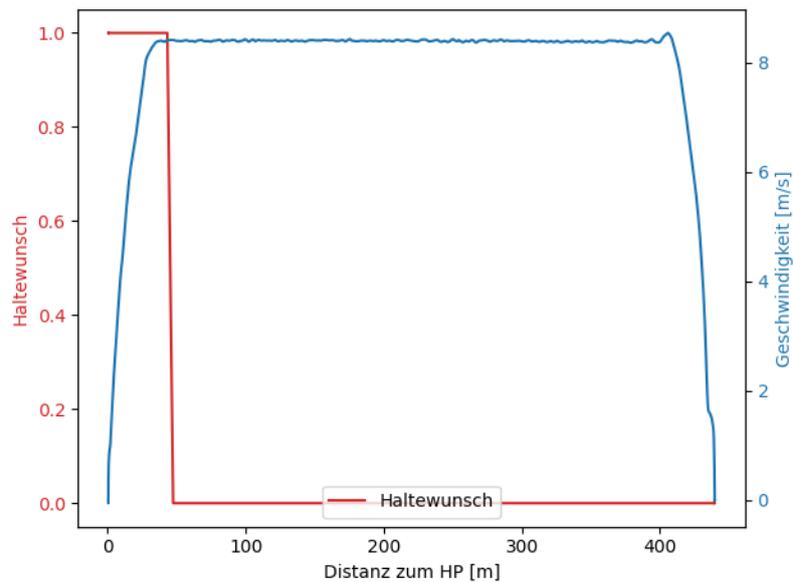


Abbildung 16: Realer Verlauf der Sollgeschwindigkeit vor und nach der Kommunikation des Haltewunsches.

4.2.3.3 Verkehrssimulation

4.2.3.3.1 Parameter

In der Simulationsstudie wurde der Einfluss von Risiko auf die Leistungsfähigkeit des Verkehrssystems untersucht. Dazu wurden weitere Anpassungen der Fahrfunktion vorgenommen, die im Folgenden kurz dargestellt werden.

Die in der Verhaltensentscheidung implementierten Parameter sind nachfolgend aufgelistet:

- Geschwindigkeit
- Abstand zu vorausfahrenden Verkehrsteilnehmern:
 - Konstanter Sicherheitsabstand
 - TTC (Time-To-Collision)
- Anfahrtszeitpunkt
- Distanz zu einem Haltepunkt

Neben der Geschwindigkeit, die auch schon in der Probandenstudie relevant war, konnten die Abstände zu den vorausfahrenden Verkehrsteilnehmern variiert werden (siehe Abbildung 17). Dabei konnte ein fester und geschwindigkeitsunabhängiger Sicherheitsabstand eingestellt werden. Alternativ war es möglich, eine TTC (Time-To-Collision) zu wählen. Die TTC ist die Zeit, in der eine Kollision zweier Verkehrsteilnehmer auftritt, wenn der Kurs und die Geschwindigkeit beider Verkehrsteilnehmer beibehalten wird. Dadurch ist dieser Parameter geschwindigkeitsabhängig.

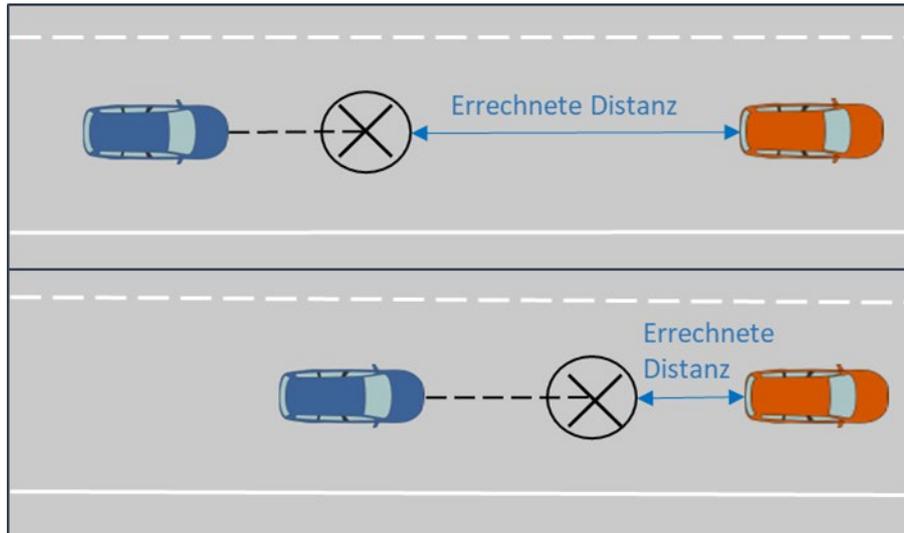


Abbildung 17: Variierte Distanz zum vorausfahrenden Fahrzeug. Die errechnete Distanz ergibt sich aus einem konstanten Sicherheitsabstand oder einer vorher definierten TTC. Oben wurde ein höherer Sicherheitsabstand bzw. eine höhere TTC eingestellt, unten eine niedrigere.

Der Anfahrtszeitpunkt betrifft Fahrsituationen, in denen das Ego-Fahrzeug zum Stehen gekommen ist und anschließend den Weg fortsetzen möchte. Solche Situationen sind beispielsweise an einer Lichtsignalanlage oder bei der Vorfahrtgewährung zu finden. Im Falle kreuzender Verkehrsteilnehmer bei unverträglichem Linksabbiegen oder einem querenden Fußgänger, konnte so auch die PET (Post-Encroachment-Time) variiert werden. Diese Größe gibt die Zeit an, in der ein Verkehrsteilnehmer eine Konfliktzone verlassen hat und der nächste Verkehrsteilnehmer in diese Konfliktzone eintritt.

Zuletzt konnte der Haltepunkt variiert werden. Damit wurde die Position geändert, an dem das automatisierte Fahrzeug an einer Ampel oder einem Fußgängerüberweg zum Stehen kam.

Für die Variation der Geschwindigkeit wurden die Dynamikdaten der Zielpose geändert; für die Parameter „Abstand zu vorausfahrenden Verkehrsteilnehmern“ und „Distanz zu einem Haltepunkt“ wurde die Position der Zielpose verschoben. Dabei ergab sich die neue Position aus dem gewünschten und eingestellten Abstand zu vorausfahrenden Verkehrsteilnehmern bzw. zu einem Haltepunkt aus der Wahl der TTC oder einem konstanten Sicherheitsabstand. Für den Anfahrtszeitpunkt wurde das Wechseln vom Manöver „Halten“ zum Manöver „Fahrstreifen folgen“ zeitlich verzögert, sodass das Fahrzeug später losfuhr.

4.2.3.3.2 Framework

Für die Untersuchung des Zusammenhangs von Risiko und Leistungsfähigkeit des Verkehrssystems wurde in VTD (Virtual Test Drive) eine Simulationsstudie mit der automatisierten Fahrfunktion durchgeführt. Dafür wurden einige typische Szenarien an Knotenpunkten und Geraden im urbanen Umfeld betrachtet und das Verhalten des automatisierten Fahrzeugs in der Simulation aufgezeichnet. Diese entstandenen Daten wurden genutzt, um in SUMO (Simulation of Urban Mobility) den Einfluss des automatisierten Fahrzeugs auf das Verkehrssystem zu untersuchen.

Der Aufbau des für die Versuche genutzten Frameworks orientiert sich an dem in der Probandenstudie in Kapitel 5.3 genutzten Framework. Das für diese Studie angepasste und verwendete Framework ist in Abbildung 18 dargestellt.

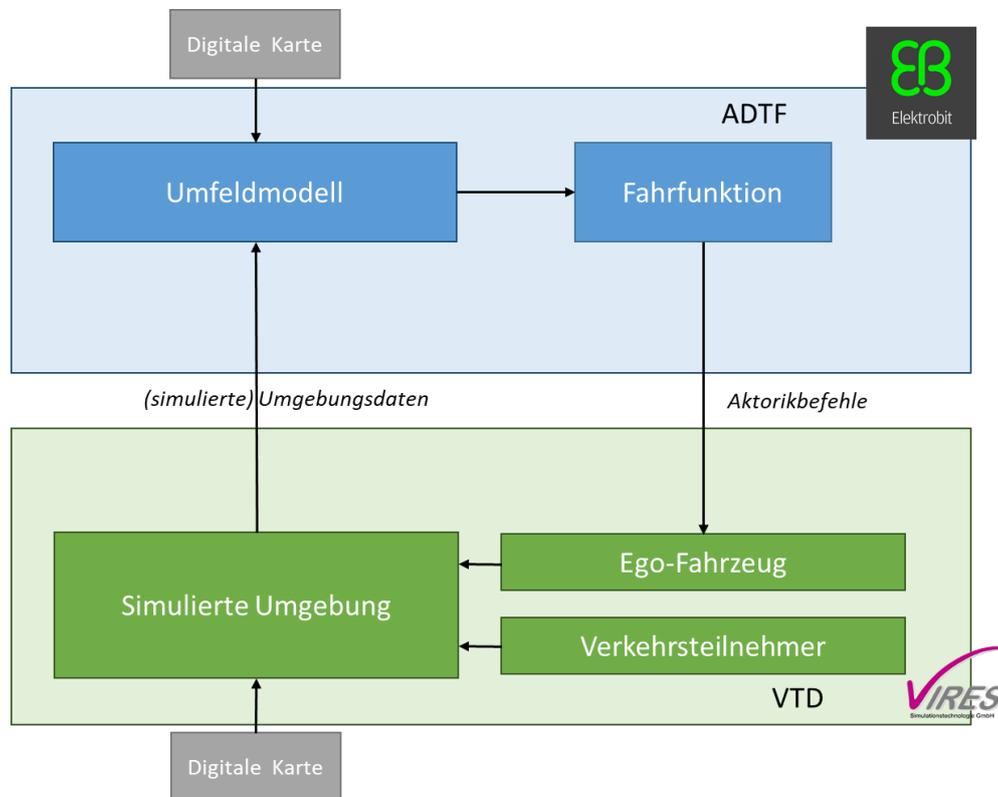


Abbildung 18: Kopplung des Software Frameworks (ADTF) und der Simulationsumgebung (VTD) für die Simulationsstudie.

Anders als bei der Probandenstudie war bei diesen Versuchen kein reales Fahrzeug involviert, sodass das Ego-Fahrzeug ebenfalls in VTD simuliert wurde. Die wichtigen Eingangsgrößen für das in VTD simulierte Fahrzeugmodell (beispielsweise die Geschwindigkeit, die Position, etc.) wurden direkt aus der Fahrfunktion genutzt und darauf basierend das Ego-Fahrzeug in der Simulation bewegt.

Die grundlegenden Beschreibungen der Simulationsumgebung VTD und des Software Frameworks (ADTF) sind in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** enthalten.

Im weiteren Verlauf werden daher nur die spezifischen Anpassungen der Simulationsumgebung und die Umsetzung der untersuchten Szenarien beschrieben.

4.2.3.3 Digitale Karten

Wie auch in der Probandenstudie, wurden für die Simulationsstudie digitale Karten erstellt. Diese Karten bildeten Knotenpunkte und Geraden aus Hannover und Braunschweig ab. Auch hier wurde zunächst eine Datenbasis mit einem 360° Laserscanner erstellt, der auf dem Fahrzeugdach eines Forschungsfahrzeugs des Instituts für Regelungstechnik angebracht ist. In Abbildung 19 ist beispielhaft ein damit aufgenommenes Luftbild der Kreuzung Podbielskistraße – Eulenkamp – Klingerstraße in Hannover abgebildet. Mit den entstandenen Luftbildern der entsprechenden

Knotenpunkte wurden daraufhin identische Karten für VTD und ADTF zur Untersuchung der zugehörigen Szenarien erstellt. Die auf Basis des Luftbilds aus Abbildung 19 Abbildung 19: Datenbasis der Kreuzung Podbielskistraße – Eulenkamp – Klingerstraße in Hannover (Knotenpunkt 3) entstandenen Karten sind in Abbildung 20 abgebildet.

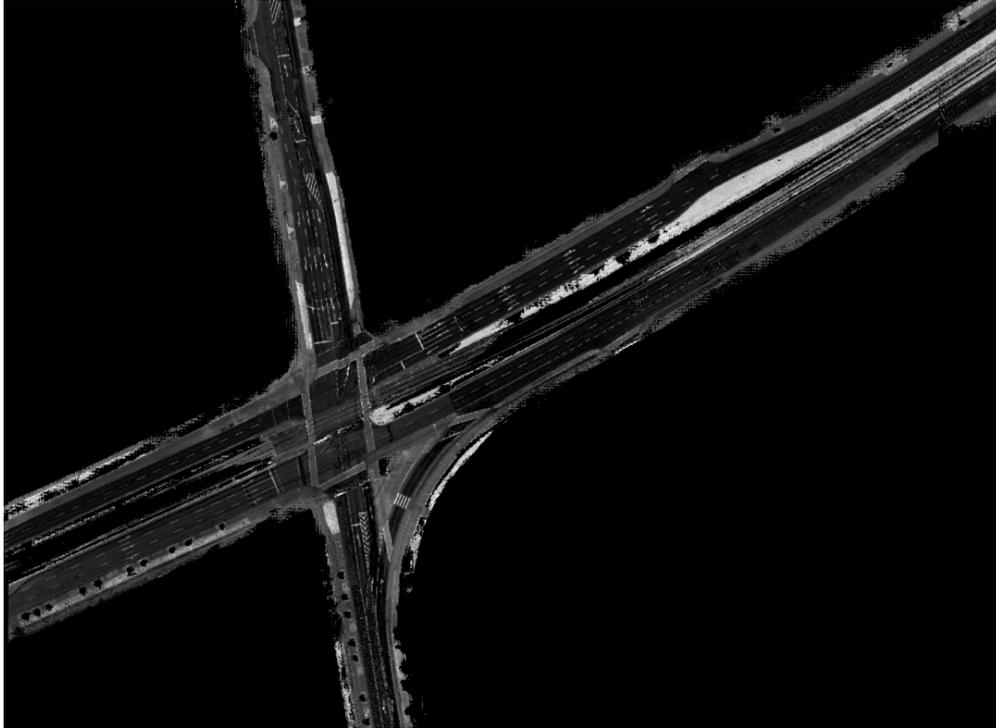


Abbildung 19: Datenbasis der Kreuzung Podbielskistraße – Eulenkamp – Klingerstraße in Hannover (Knotenpunkt 3).

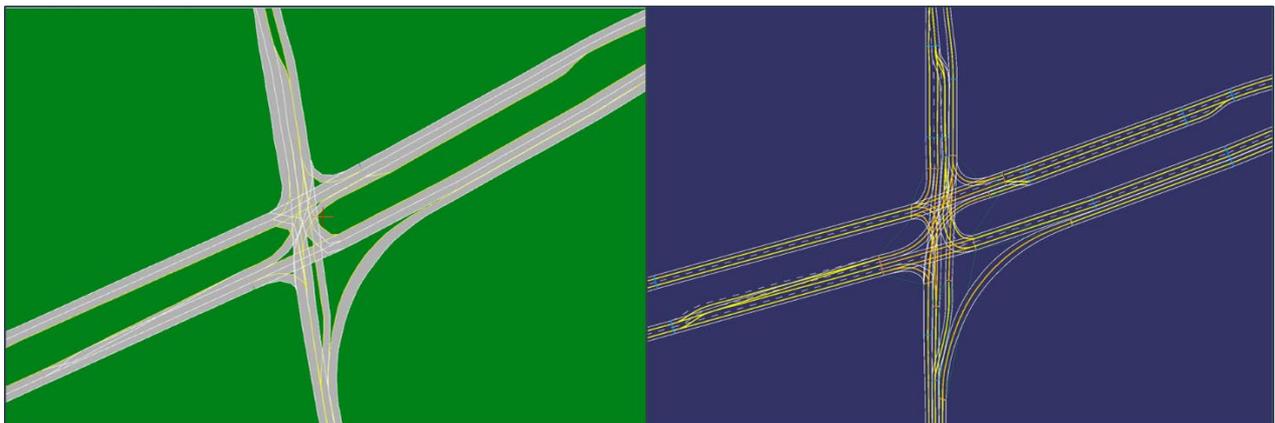


Abbildung 20: Erstellte digitale Karten für VTD (links) und ADTF (rechts), basierend auf der Kreuzung Podbielskistraße – Eulenkamp – Klingerstraße in Hannover (Knotenpunkt 3)

Insgesamt wurden Szenarien an sechs Straßenabschnitten in Hannover und Braunschweig implementiert. Im Tabelle 1 sind die Straßenabschnitte aufgeführt, die für die Simulationsstudie betrachtet wurden. Für all diese Straßenabschnitte sind digitale Karten erzeugt worden.

Tabelle 1: Straßenabschnitte für die Szenarien in der Simulationsstudie

#	Straßenabschnitt	Koordinaten (UTM)	Straßentopologie
1	Rebenring/Geysostraße/Pockelstraße, Braunschweig	E: 604285.856 N: 5792781.441	Knotenpunkt
2	Spichernstraße/Lützeroderstraße /Drostestraße/Roberstraße, Hannover	E: 550568.377 N: 5804473.108	Knotenpunkt (Kreisverkehr)
3	Eulenkamp/Podbielskistraße /Klingerstraße, Hannover	E: 553857.414 N: 5806161.262	Knotenpunkt
4	Rebenring, Braunschweig	E: 604332.638 N: 5792783.319	Gerade
5	Arndtstraße/Vahrenwalderstraße /Hamburger Allee	E: 549928.150 N: 5804068.447	Knotenpunkt
6	Celler Straße/Hamburger Allee, Hannover	E: 550229.364 N: 5803779.508	Knotenpunkt

4.2.3.3.4 Szenarien

Im Gegensatz zur Probandenstudie (siehe Kapitel 5.3) war für die Simulationsstudie keine 3D Modellierung der Umgebung nötig, da diese Modellierung lediglich für das menschliche Erleben eines Szenarios erzeugt wird. Für die Simulationsstudie sollten lediglich die Fahrdaten des Ego-Fahrzeugs und relevanter Verkehrsteilnehmer aufgezeichnet werden. Folglich reichten digitale Karten aus, auf der sich die Verkehrsteilnehmer und das Ego-Fahrzeug befanden. Im Weiteren werden die untersuchten Szenarien genauer erklärt und die erzeugten Daten beschrieben.

Die untersuchten Szenarien enthielten das Ego-Fahrzeug und andere Verkehrsteilnehmer. In den Szenarien an Knotenpunkten (1, 2, 3, 5, 6) wurden die Geschwindigkeiten des Ego-Fahrzeugs und die der anderen Verkehrsteilnehmer variiert.

Am Beispiel des Knotenpunktes 6 und der Gerade 4 werden die verschiedenen Szenarien genauer beschrieben. Eine vollständige Liste der untersuchten Szenarien ist im Anhang in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** gegeben.

In Abbildung 21 links befindet sich das Ego-Fahrzeug auf einem Kreuzungsarm am Knotenpunkt 6 unten rechts im Bild und befährt in verschiedenen Simulationsläufen jeden abgehenden Fahrstreifen. So biegt es links und rechts ab und folgt dem Fahrstreifen in gerader Richtung (schwarze Pfeile). Dieses Vorgehen wurde für jeden Kreuzungsarm wiederholt, jeweils bei einer Ego-Geschwindigkeit von 50 km/h. Zudem wurden einige der gerade beschriebenen Szenarien mit einem vorausfahrenden Fahrzeug ergänzt. Dies betraf alle Szenarien auf denen dem Fahrstreifen in gerader Richtung gefolgt wird. Für die Abbiegevorgänge links und rechts wurden nur die Fahrstreifen mit der geringsten Krümmung betrachtet. Das vorausfahrende Fahrzeug hatte bei den entsprechenden Szenarien eine um 10 km/h und eine um 5 km/h verringerte Geschwindigkeit als das Ego-Fahrzeug.

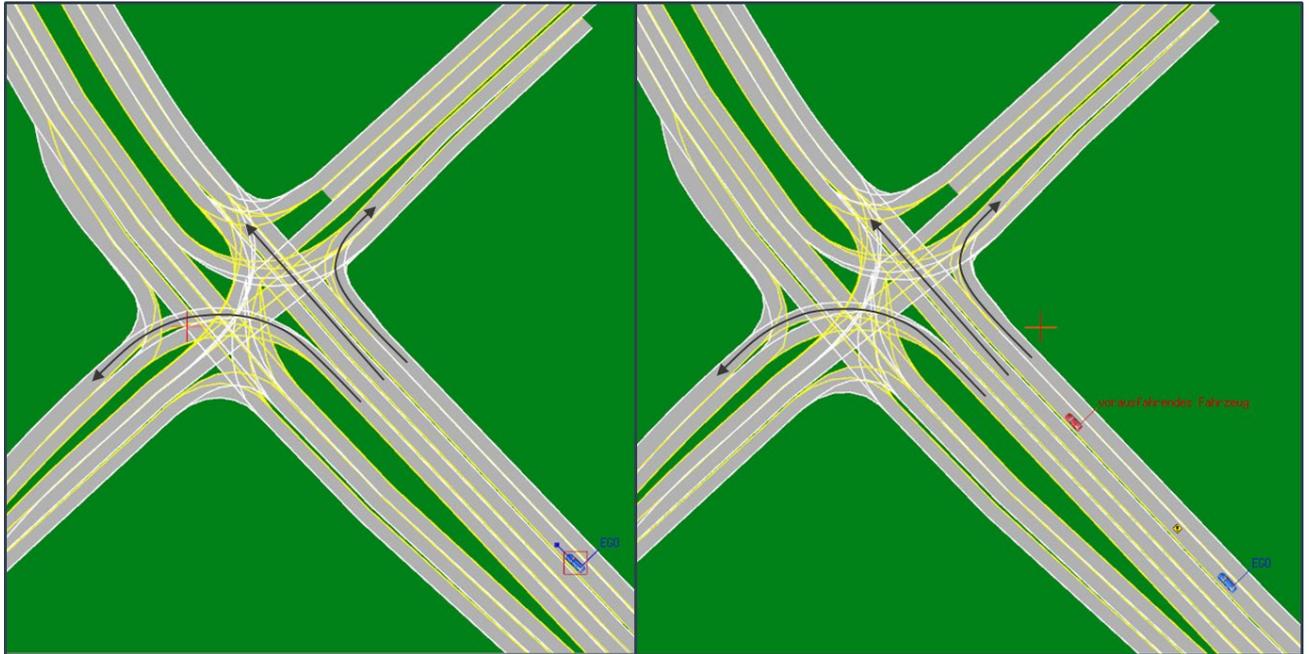


Abbildung 21: Szenarien am Beispiel des Knotenpunktes 6. Einige Szenarien wurden ohne vorausfahrendes Fahrzeug bei einer Ego-Geschwindigkeit durchgeführt, einige Szenarien mit einem vorausfahrenden Fahrzeug (40 km/h bzw. 45 km/h). Die schwarzen Pfeile markieren die Fahrtrichtungen.

Grundsätzlich wurde dieses Vorgehen an den Knotenpunkten 1, 3 und 5 wiederholt. Allerdings gab es einige Ergänzungen oder Variationen, die im Folgenden erläutert werden.

Knotenpunkt 3 war ein Kreisverkehr. Dieser wurde mit einer Ego-Geschwindigkeit von 50 km/h und 30 km/h befahren. In Szenarien mit vorausfahrendem Fahrzeug fuhr dieses 10 km/h bzw. 5 km/h langsamer als das Ego-Fahrzeug.

An Knotenpunkt 1 wurde zusätzlich unverträglich links abgebogen. Die Wunschgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs war auch hier 50 km/h; es kam in der Kreuzung zum Stehen und setzte den Weg fort, nachdem das entgegenkommende Fahrzeug das Ego-Fahrzeug passierte. Der Zeitpunkt des Anfahrens nach dem Haltevorgang wurde dabei variiert („früh“, „mittel“ und „spät“).

Die Gerade 4 wurde zunächst bei 50 km/h bzw. 30 km/h Ego-Geschwindigkeit ohne weitere Verkehrsteilnehmer befahren. Eine Ergänzung dieses Szenarios war ein vorausfahrendes Fahrzeug und ein querender Fußgänger.

In den Szenarien aus Abbildung 22 oben folgte das Ego-Fahrzeug dem Fahrstreifen bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h. Beim Passieren des Auslösungspunktes (gelbe Raute) querte der Fußgänger die Straße entlang der vordefinierten Trajektorie (Trajektorie_FG). Das Ego-Fahrzeug bremste auf den Fußgänger, ließ ihn passieren und setzte anschließend die Fahrt fort. Der Anfahrtszeitpunkt wurde auch hier variiert in „früh“, „mittel“ und „spät“.

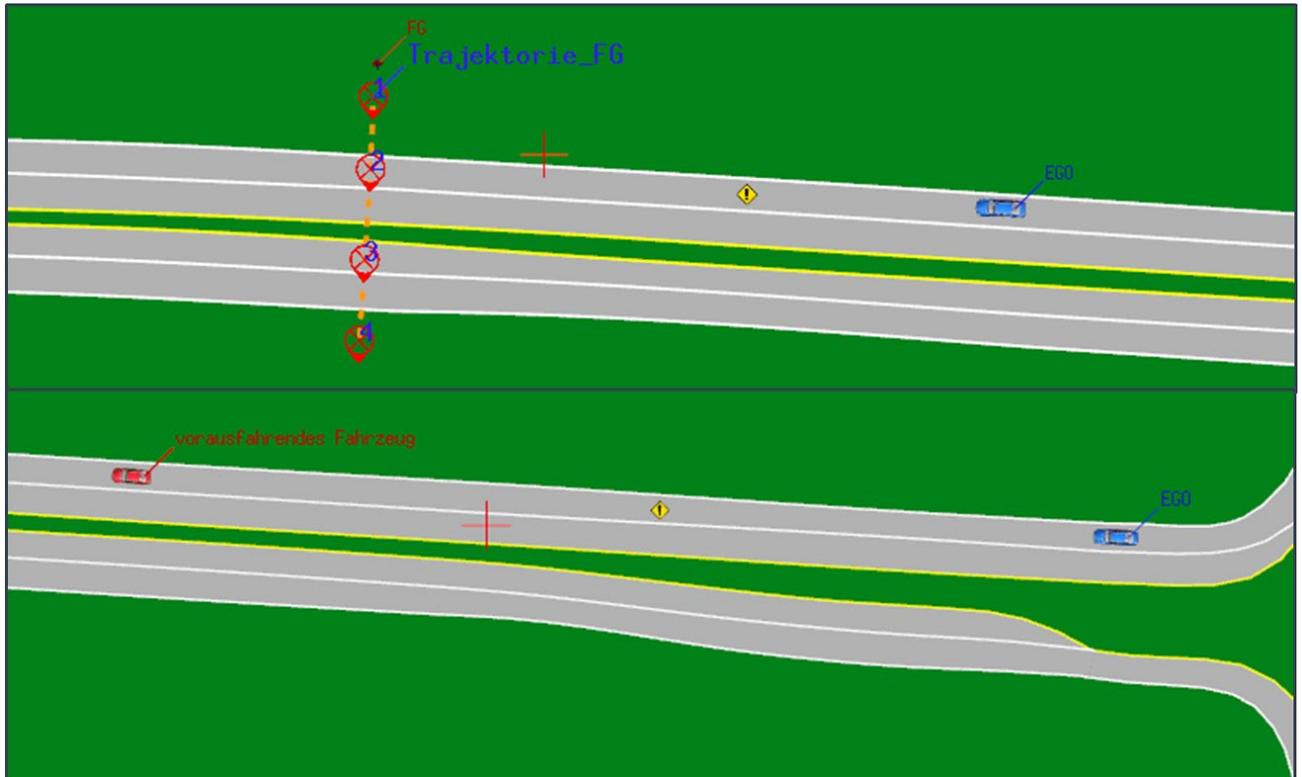


Abbildung 22: Szenarien am Beispiel der Geraden 4. Das Ego-Fahrzeug folgt der Geraden mit 30 km/h bzw. 50 km/h. In einigen Szenarien kreuzt ein Fußgänger die Fahrbahn, dem das Fahrzeug Vorfahrt gewähren muss (oben). In anderen Szenarien befindet sich ein vorausfahrendes Fahrzeug auf dem Ego-Fahrstreifen mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h bzw. 10 km/h geringer als der Ego-Geschwindigkeit.

Weiterhin wurden Szenarien bei einer Ego-Geschwindigkeit bei 50 km/h bzw. 30 km/h mit einem vorausfahrenden Fahrzeug durchgeführt (Abbildung 22 unten). Das vorausfahrende Fahrzeug fuhr dabei 5 km/h bzw. 10 km/h langsamer als das Ego-Fahrzeug.

4.2.3.4 Im Fahrsimulator

Im ersten Szenario ging es um die Innensicht der Mitfahrer eines automatisierten Fahrzeugs. Im zweiten Szenario wurde neben der Innensicht auch die Außensicht von Fußgängern und Radfahrern umgesetzt. Die Szenarien und die implementierten Einflussgrößen werden im Folgenden dargestellt. Erweitert wurde dies um die Möglichkeit, als Proband selbst bestimmte Auslegungen einstellen zu können.

4.2.3.4.1 Szenario 1: Gerade Hauptstraße

Die folgenden Einflussgrößen wurden in diesem Fahrszenario systematisch variiert (siehe Tabelle 2):

Tabelle 2: Relevante Einflussgrößen auf das erlebte Risiko von Mitfahrern im automatisierten Fahrzeug.

Einflussgröße	Untersuchte Ausprägungen
Geschwindigkeit	50 km/h / 30 km/h
Gegenverkehr	Ja / Nein
Fußgängerpräsenz	Ja / Nein
Lateraler Versatz des Ego Fahrzeugs im eigenen Fahrstreifen	Kein Versatz / Versatz nach links / Versatz nach rechts

Mit der Geschwindigkeit und der Trajektorie (lateraler Versatz) des automatisierten Fahrzeugs wurden zwei Fahrparameter der automatisierten Fahrfunktion variiert. Die beiden Ausprägungen der Geschwindigkeit, 30 km/h und 50 km/h, sind innerorts übliche Geschwindigkeitsgrenzen. Die Trajektorie des automatisierten Fahrzeugs wurde durch einen lateralen Versatz im eigenen Fahrstreifen angepasst, um ein zu enges Vorbeifahren am Fußgänger zu vermeiden. Andererseits kann ein dichtes Vorbeifahren an entgegenkommenden Fahrzeugen ebenso ein Grenzzisiko darstellen, sodass hier Fahrzeugtrajektorien mit lateralem Versatz nach links und rechts implementiert wurden. Der laterale Versatz von der Fahrstreifenmitte begann 2.4 s vor dem parkenden Fahrzeug. Zu diesem Zeitpunkt lag die Entfernung zum Gegenverkehr bei 15 m. Der maximale Versatz im eigenen Fahrstreifen nach links war auf der Höhe des Fußgängers erreicht. Die maximale Abweichung von der Fahrstreifenmitte betrug 0.5 m nach links bzw. nach rechts (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Um den lateralen Abstand zum Gegenverkehr (abgesehen von der eigenen Trajektorie) konstant zu halten, wurde als entgegenkommendes Fahrzeug in jeder Variante des Fahrplanszenarios dasselbe Fahrzeug ausgewählt.

Damit Grenzzustände mit hoher Wahrscheinlichkeit auftreten, wurde die Komplexität des Fahrplanszenarios mithilfe von Gegenverkehr erhöht. Durch den Gegenverkehr beobachtet der Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug nicht nur den Fußgänger rechts auf dem Parkstand, sondern auch auf den Gegenverkehr als zweiten relevanten Reiz in dieser Fahrsituation.

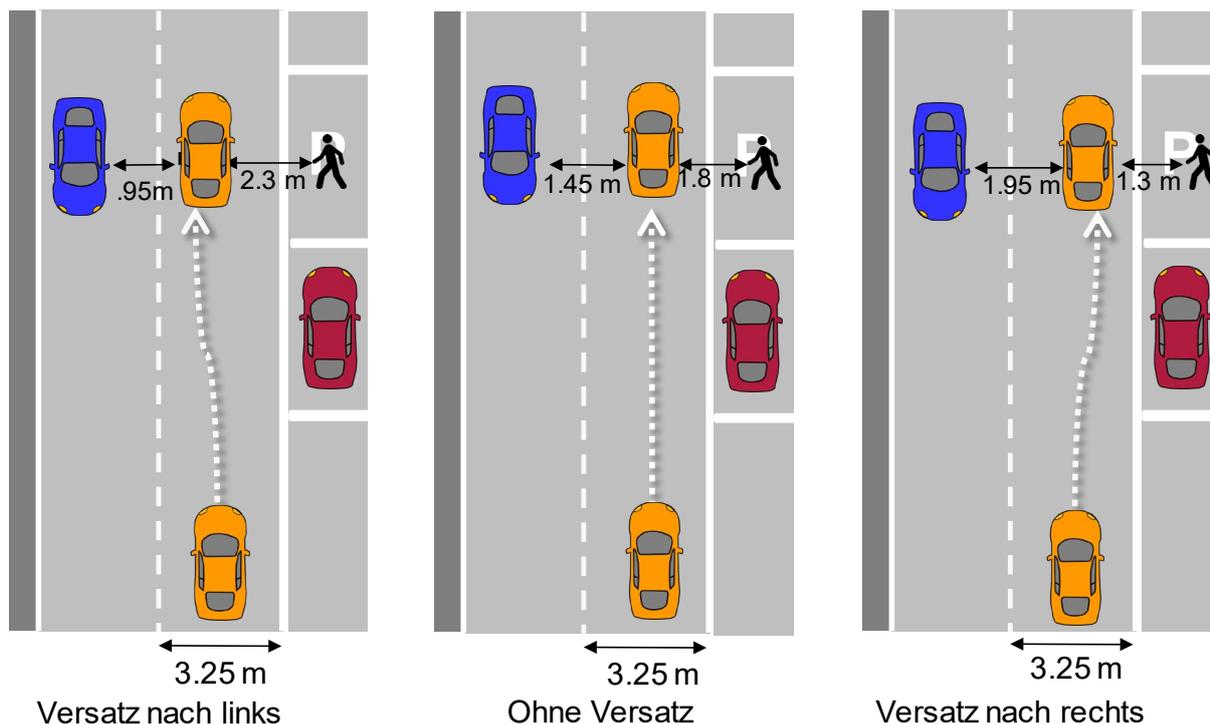


Abbildung 23: Schematische Darstellung der lateralen Abstände zum Gegenverkehr und zur Fußgängerin in Metern (m) bei lateralem Versatz nach links, keinem lateralem Versatz (Mitte), und lateralem Versatz nach rechts.

4.2.3.4.2 Szenario 2: Einmündung

In diesem Fahrscenario wurde hinsichtlich der automatisierten Fahrfunktion die Anfahrtsgeschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs an die Einmündung variiert. Bei der Variation der weiteren Einflussgrößen auf das erlebte Risiko menschlicher Verkehrsteilnehmer ist zu unterscheiden, aus welcher Perspektive (Innen: Mitfahrer vs. Außen: Fußgänger, Radfahrer) das Szenario erlebt wird. Tabelle 3 bietet einen zusammenfassenden Überblick über die untersuchten Ausprägungen der Einflussgrößen.

Tabelle 3: Variation der Einflussgrößen im Fahrscenario Einmündung aus der Innen- und Außensicht.

Einflussgröße	Untersuchte Ausprägungen
Innen: Mitfahrer	
Geschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs	50 km/h / 30 km/h
Art des schwächeren Verkehrsteilnehmers	Fußgänger / Radfahrer
Richtung, aus der der schwächere Verkehrsteilnehmer die Einmündung kreuzt	Links / Rechts
Außen: Fußgänger & Radfahrer	
Geschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs	30 km/h / 50 km/h
Perspektive	Fußgänger / Radfahrer
Richtung, aus der das automatisierte Fahrzeug kreuzt	Links / Rechts

Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigen die Umsetzung des Fahrscenario aus der Innensicht des Mitfahrers im automatisierten Fahrzeug in der Interaktion mit einem Radfahrer bzw. mit einem Fußgänger.



Abbildung 24: Variationen des Szenarios aus Mitfahrersicht. Links: Radfahrer überquert die Straße von links. Rechts: Radfahrer überquert die Straße von rechts.



Abbildung 25: Variationen des Szenarios aus Mitfahrersicht. Links: Fußgänger überquert die Straße von links. Rechts: Fußgänger überquert die Straße von rechts.

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt die Umsetzung aus der Außensicht schwächerer Verkehrsteilnehmer. Die Geschwindigkeit des Fußgängers und des Radfahrers war auf 3 km/h respektive auf 12 km/h konstant festgelegt.



Abbildung 26: Variationen des Szenarios aus der Außensicht eines schwächeren Verkehrsteilnehmers. Links: Automatisiertes Fahrzeug nähert sich der Einmündung von links. Rechts: Automatisiertes Fahrzeug nähert sich der Einmündung von rechts.

4.3 Entwicklung einer Bewertungsmethodik für erlebtes Risiko (TUBS)

Voraussetzung für die Studien zum erlebten Risiko war es, eine Befragungsmethodik (geeignete Skalen, Verankerung, geeignetes Antwortformat) zu entwickeln und zu validieren, um das erlebte Risiko menschlicher Verkehrsteilnehmer in der Interaktion mit

automatisierten Fahrzeugen zu messen. Das erlebte Risiko sollte sowohl aus der Innensicht eines Mitfahrers im automatisierten Fahrzeug als auch aus der Außensicht schwächerer Verkehrsteilnehmer erfasst werden. Dazu wurden verschiedene quantitative Messinstrumente in Form von Ratingskalen in einer Fahrsimulatorstudie miteinander verglichen. Zu diesem Zweck wurden erste Untersuchungen in einem ausgewählten Szenario im Fahrsimulator durchgeführt, bei denen unterschiedliche Auslegungen der automatisierten Fahrfunktion im Vergleich präsentiert wurden. Auf diese Weise wurde die Sensitivität der Messmethodik überprüft. Eine hohe Sensitivität bedeutet, dass das Messinstrument in der Lage ist, bereits kleine Veränderungen im erlebten Risiko numerisch abzubilden. Eine weitere Anforderung an das Messinstrument war die Verständlichkeit der Ratingskala für die Befragten. Diese beiden Aspekte waren die zentralen Fragestellungen für die im Folgenden dargestellte Studie.

4.3.1 Versuchsplan

Für diese Fahrsimulatorstudie wurde das Szenario Einmündung als Fahrscenario verwendet (siehe Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). In diesem Fahrscenario nahmen die Probanden eine der zwei folgenden Perspektiven in einem simulierten städtischen Einmündungsszenario ein: (1) Fahrradfahrer, oder (2) Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug.

In der Fahrsimulatorstudie wurden mit der Geschwindigkeit (10 km/h, 30 km/h, 50 km/h) und der Bremsstärke (2 m/s², 4.5 m/s², 8.9 m/s²) zwei zentrale Parameter der Fahrfunktion des simulierten automatisierten Fahrzeugs variiert (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Versuchsplan der Fahrsimulatorstudie zur Befragungsmethodik mit den zwei Faktoren Geschwindigkeit und Bremsstärke.

Faktor B: Bremsstärke	Faktor A: Geschwindigkeit		
	10 km/h	30 km/h	50 km/h
leicht (2 m/s ²)	1	4	7
mittel 4.5 (m/s ²)	2	5	8
stark 8.9 (m/s ²)	3	6	9

Die höchste Bremsstärke von 8.9 m/s² ist eine Vollbremsung des automatisierten Versuchsträgers "LEONIE" des Instituts für Regelungstechnik (TU Braunschweig) und wurde deshalb als höchste Stufe dieser Einflussgröße für die Validierungsstudie ausgewählt. Mit den Bremsstärken von 4.5 m/s² und 2 m/s² wurden eine mittlere und leichte Bremsung realisiert. Mit 50 km/h wurde die zulässige Höchstgeschwindigkeit innerhalb geschlossener Ortschaften in Deutschland gewählt. Über die Geschwindigkeiten 30 km/h und 10 km/h wurden eine mittlere und langsame Geschwindigkeit abgedeckt. Der Anfahrtsweg des automatisierten Fahrzeugs variierte in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit und lag bei 10 km/h bei 50 m, bei 30 km/h bei 130 m, und bei 50 km/h bei 210 m, um die Länge des erlebten Fahrscenario aus Sicht der Verkehrsteilnehmer konstant zu halten. Der Haltepunkt lag vor der ersten Radfahrstreifenmarkierung und somit 1.90 m vom Radfahrer entfernt. Das automatisierte Fahrzeug kam in jeder der neun dargebotenen Varianten an der gleichen Haltelinie zum Stehen. Der Bremszeitpunkt des automatisierten Fahrzeugs, d.h. die Distanz des automatisierten Fahrzeugs zur Haltelinie, verschiebt sich entsprechend in Abhängigkeit der festgelegten Bremsstärke. Die entsprechenden Abstände sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt.

Tabelle 5: Abstand (in m) des automatisierten Fahrzeugs zur Haltelinie bei Bremsbeginn in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit.

Bremsstärke	Geschwindigkeit		
	10 km/h	30 km/h	50 km/h
leicht (2 m/s ²)	5.6	23.0	52.7
mittel 4,5 (m/s ²)	3.4	12.3	26.8
stark 8,9 (m/s ²)	3.1	8.6	17.0

Die Probanden erlebten alle neun Varianten des Fahr Szenarios entweder aus der Innensicht oder aus der Außensicht.

4.3.2 Versuchspersonen

An der Fahrsimulatorstudie nahmen sechs Probanden teil, wobei jeweils drei Probanden die Mitfahrer- und Fahrradfahrersicht erlebten. In der Substichprobe für die Fahrradfahrersicht waren drei Probanden (zwei weiblich) im Alter zwischen 23 und 59 Jahren ($M = 37.3$ Jahre, $SD = 19.1$ Jahre). Die Substichprobe für die Mitfahrersicht umfasste ebenso drei Probanden (zwei weiblich) im Alter zwischen 35 und 54 Jahren ($M = 47.0$ Jahre, $SD = 10.4$ Jahren).

4.3.3 Material und Geräte

In Abhängigkeit der Gruppenzugehörigkeit (Fahrradfahrer, Mitfahrer) fuhren die Probanden entweder im statischen Fahrzeugsimulator oder im statischen Fahrradsimulator des Lehrstuhls für Ingenieur- und Verkehrspsychologie (TU Braunschweig). Eine Beschreibung der Simulatoren befindet sich in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Nach jeder Einzelfahrt beantworteten die Probanden denselben Fragebogen. Dieser umfasste unter anderem eine sprachgebundene Risikoskala (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Abbildung 27), welche in Anlehnung an Neukum et al. (2008) im Rahmen eines anderen Forschungsprojekts zum hochautomatisierten Fahren im Mischverkehr entwickelt wurde (siehe Stange et al., 2020). Die 8-stufige Skala beinhaltet vier Kategorien von „harmlos“ bis „Situation nicht akzeptabel“. In den Kategorien „unangenehm“ und „gefährlich“ wird die Bewertung in den Antwortmöglichkeiten „wenig“, „mittel“ und „sehr“ verfeinert. Die Kategorien „gefährlich“ und „Situation nicht akzeptabel“ sind für die Verortung des Grenzzrisikos der Probanden entscheidend.

Situation nicht akzeptabel	
Gefährlich	sehr
	mittel
	wenig
Unangenehm	sehr
	mittel
	wenig
Harmlos	

Abbildung 27: Risikoskala.

Darüber hinaus wurden mit dem Self-Assessment Manikin (SAM; Bradley & Lang, 1994) drei Dimensionen mit einer sprachfreien Skala abgefragt. Die 9-stufige Skala umfasst drei bipolare Dimensionen (siehe Abbildung 28), anhand derer die Probanden die mit ihrer derzeitigen Stimmung verbundene Valenz auf einer Skala von 1 („sehr unangenehm“) bis 9 („sehr angenehm“), ihre Anspannung auf einer Skala von 1 („entspannt“) bis 9 („stark angespannt“) sowie die empfundene Dominanz auf einer Skala von 1 („sehr wenig Kontrolle / sehr unterlegen“) bis 9 („alles unter Kontrolle / sehr überlegen“) angeben können.

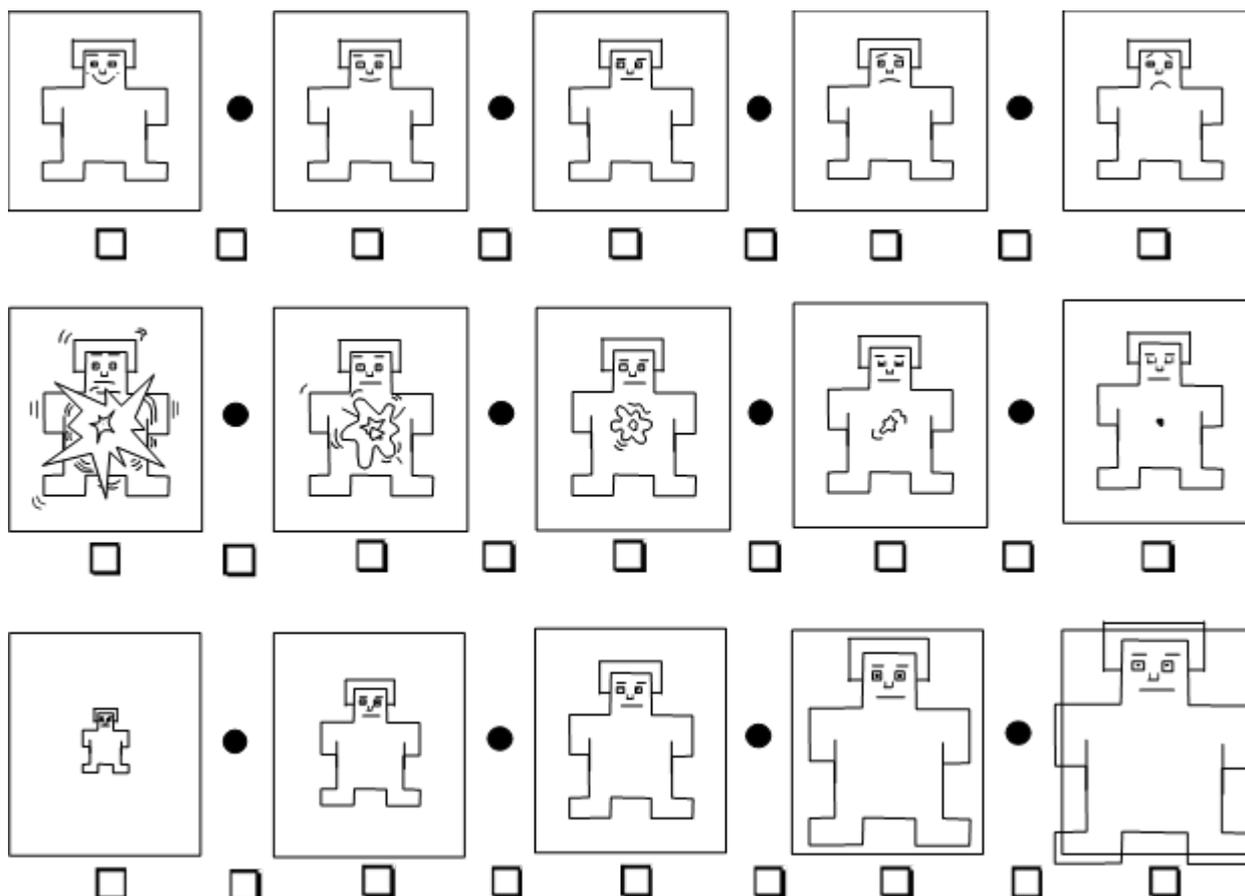


Abbildung 28: SAM Dimensionen („Valenz“, „Dominanz“ und „Anspannung“) (adaptiert nach Bradley & Lang, 1994, p. 51).

Im Anschluss an die Simulatorstudie wurde ein strukturiertes Interview mit den Probanden durchgeführt. Das Interview hatte den Zweck, die Verständlichkeit der Ratingskala zu erfragen. Das gesamte Interview wurde vom Versuchsleiter schriftlich festgehalten und mithilfe eines Diktiergeräts aufgezeichnet, um auch im Nachhinein die spontanen Äußerungen der Probanden auswerten zu können. Die vollständigen Fragebögen befinden sich im Anhang.

4.3.4 Durchführung

Nach der Begrüßung gaben die Probanden ihr Einverständnis zur Aufzeichnung und wissenschaftlichen Nutzung ihrer Daten. Anschließend wurden die Probanden je nach Gruppenzugehörigkeit entweder mit dem Simulatorfahrrad oder mit dem Fahrzeugsimulator vertraut gemacht. Vor Beginn der Studie wurde den Probanden einmal die „risikoärmste“ Variante der Fahrfunktion (10 km/h, 2.0 m/s²) und einmal die „risikoreichste“ Variante der Fahrfunktion (50 km/h, 8.9 m/s²) präsentiert. Diese beiden extremsten Ausprägungen der Fahrfunktion sollten als Referenzpole für die Bewertung des erlebten Risikos dienen. Danach wurden die insgesamt neun Varianten der Fahrfunktion in randomisierter Reihenfolge präsentiert. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, die vorangegangene Interaktion hinsichtlich ihres erlebten Risikos zu bewerten. Nach Abschluss der Simulatorstudie wurde ein strukturiertes Interview

durchgeführt, um die Verständlichkeit des Befragungsmaterials zu evaluieren. Die vollständigen Instruktionen befinden sich im Anhang.

4.3.5 Ergebnisse

4.3.5.1 Innensicht: Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug

Abbildung 29 zeigt die Ergebnisse der Bewertungen auf der Risikoskala aus der Innensicht des Mitfahrers. Dargestellt ist das erlebte Risiko in Abhängigkeit der Stärke der Verzögerung getrennt für die drei Geschwindigkeitsbereiche. Hier wird deutlich, dass die geringe (und damit frühe) Verzögerung zu dem kleinsten erlebten Risiko führt. Sowohl die mittlere als auch die sehr starke Verzögerung führen zu einem deutlich höheren erlebten Risiko, wobei insbesondere bei der niedrigen Geschwindigkeit bereits ein relativ hoher Wert knapp unter „gefährlich“ erreicht wurde. Insbesondere bei einer Grundgeschwindigkeit von 50 km/h steigt das erlebte Risiko vor allem bei sehr starker (und damit sehr später) Bremsung noch einmal sehr deutlich an.

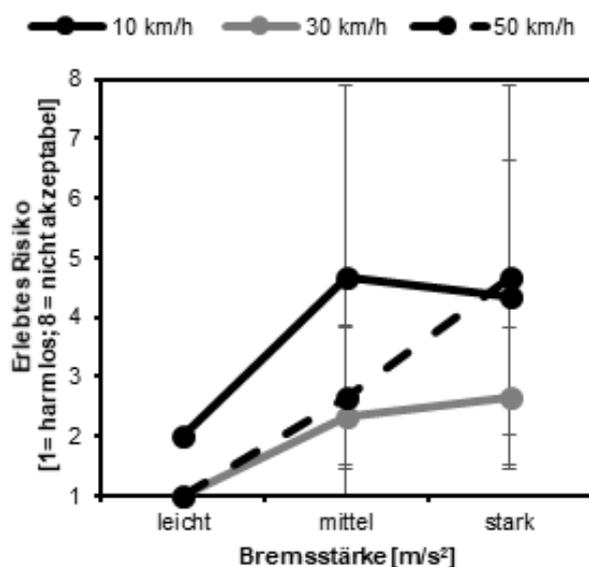


Abbildung 29: Subjektive Risikobewertung in Abhängigkeit der Stärke der Verzögerung für die drei unterschiedlichen Grundgeschwindigkeiten.

Insgesamt lagen allerdings alle neun präsentierten Varianten im Mittel noch unterhalb des Bereichs „gefährlich“ (5) oder „nicht akzeptabel“ (8). Somit lagen alle mittleren Bewertungen unterhalb des Grenzkrisikos in den Skalenbereichen „harmlos“ bis „unangenehm“. Jedoch wurden drei der neun Varianten im Mittel als „sehr unangenehm“ bewertet. Dabei handelt es sich um die Varianten (1) 10 km/h, mittel starke Verzögerung, (2) 10 km/h, starke Verzögerung, und (3) 50 km/h, starke Verzögerung.

Damit spielt die Verzögerungsstärke insgesamt die größte Rolle, wobei zusätzlich die Geschwindigkeit hinzukommt und insbesondere bei der langsamen Geschwindigkeit ein frühzeitiges und sanftes Bremsen sinnvoll erscheint.

Von der methodischen Seite her bewerteten alle Probanden die sprachgebundene Risikoskala im strukturierten Interview als leicht und eindeutig verständlich. Weiterhin

differenziert die Skala sehr schön zwischen den verschiedenen Bedingungen, so dass sie sensitiv für Veränderungen des erlebten Risikos zu sein scheint.

Die mittlere Situationsbewertung auf den drei Dimensionen des SAM (siehe Abbildung 30) fällt je nach Dimension unterschiedlich aus. Valenz und Anspannung zeigen ein sehr vergleichbares Muster wie das erlebte Risiko. Die leichte Verzögerung wird als angenehm bis sehr angenehm bewertet. Stärkere Verzögerungen werden schlechter bewertet. Auch hier fällt besonders die sehr starke Verzögerung bei 50 km/h als deutlich negativste Variante auf. Umgekehrt steigt die Anspannung der Probanden mit zunehmender Bremsstärke an, wobei wiederum der höchste Wert bei der stärksten Verzögerung bei 50 km/h zu finden ist. Auch bei der Dominanz ist der Verlauf ähnlich, wobei die Differenzierung hier am geringsten ist.

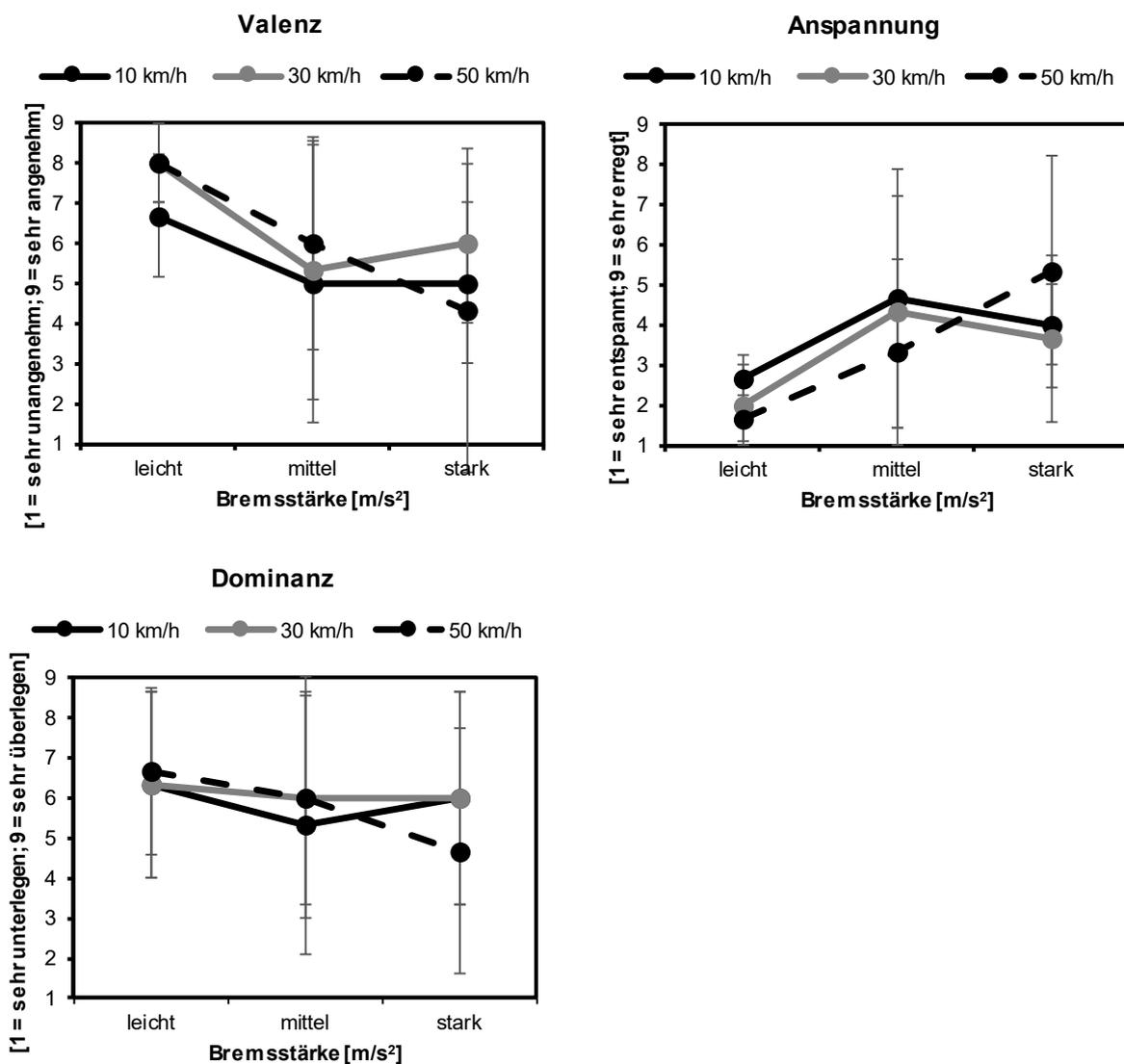


Abbildung 30: Mittlere Bewertungen der Probanden aus Mitfahrersicht auf den drei Dimensionen (Valenz, Anspannung, Dominanz) der SAM Skala.

Damit validieren diese Bewertungen die Ergebnisse der Risikoskala. Allerdings scheint die Differenzierung der verschiedenen Verzögerungen und Grundgeschwindigkeiten bei

der Risikoskala deutlicher als bei der SAM. Dies mag durch die Verwendung verbaler Kategorien bedingt sein, die besser geeignet sind, die Stärke der Empfindungen anzugeben als reine grafische Darstellungen mit variierender Größe der Grafik.

4.3.5.2 Außensicht: Radfahrer

Aus Außensicht eines Radfahrers geht eine höhere Anfahrtsgeschwindigkeit eines automatisierten Fahrzeugs mit einem subjektiv höheren erlebten Risiko einher (siehe Abbildung 31). Während die Probanden alle drei Varianten mit der Geschwindigkeit von 10 km/h im Bereich „harmlos“ bewerteten, lagen die mittleren Bewertungen der sechs Varianten mit 30 km/h und 50 km/h im Bereich „unangenehm“. Alle mittleren Bewertungen befanden sich jedoch in der unteren Hälfte der Skala. Das Fahrverhalten des automatisierten Fahrzeugs wurde im Mittel nicht als „gefährlich“ oder sogar „nicht akzeptabel“ bewertet. Insgesamt bildet die Risikoskala Unterschiede im erlebten Risiko der Radfahrer messbar ab. Interessant ist jedoch, dass aus der Außensicht die unterschiedlichen Verzögerungen nicht so eine große Rolle spielen wie aus der Innensicht. Der Einfluss der Grundgeschwindigkeit erscheint jedoch ähnlich.

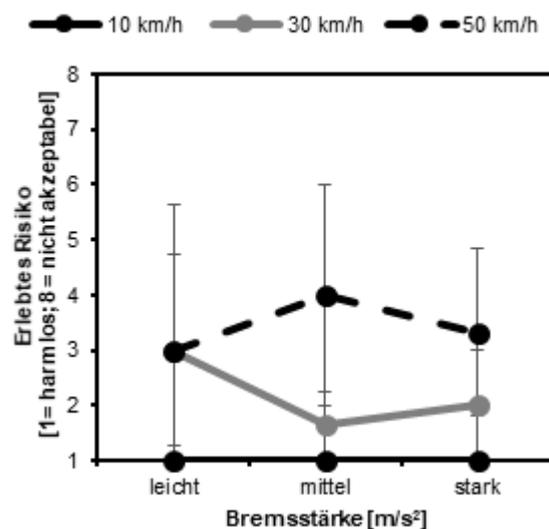


Abbildung 31: Mittlere Risikobewertung aus Radfahrersicht in Abhängigkeit der Stärke der Verzögerung für die drei unterschiedlichen Grundgeschwindigkeiten.

Auf der SAM Skalen bewerteten Probanden die Situation als sehr angenehm („Valenz“) und fühlten sich sehr überlegen („Dominanz“, siehe Abbildung 32). Ein gegenläufiger Trend zeigt sich hinsichtlich der Dimension „Anspannung“. Die Probanden waren bei 10 km/h Anfahrtsgeschwindigkeit gar nicht angespannt. Bei 30 km/h lag die Anspannung im niedrigen Bereich, und bei 50 km/h im mittleren Bereich der Skala.

Diese Ergebnisse der SAM Skalen sind konsistent mit denen der Risikoskala, denn auch hier fielen die Situationsbewertungen mit zunehmender Geschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs negativer aus. Bei 50 km/h lagen die mittleren Bewertungen bei beiden Messskalen im mittleren Bereich.

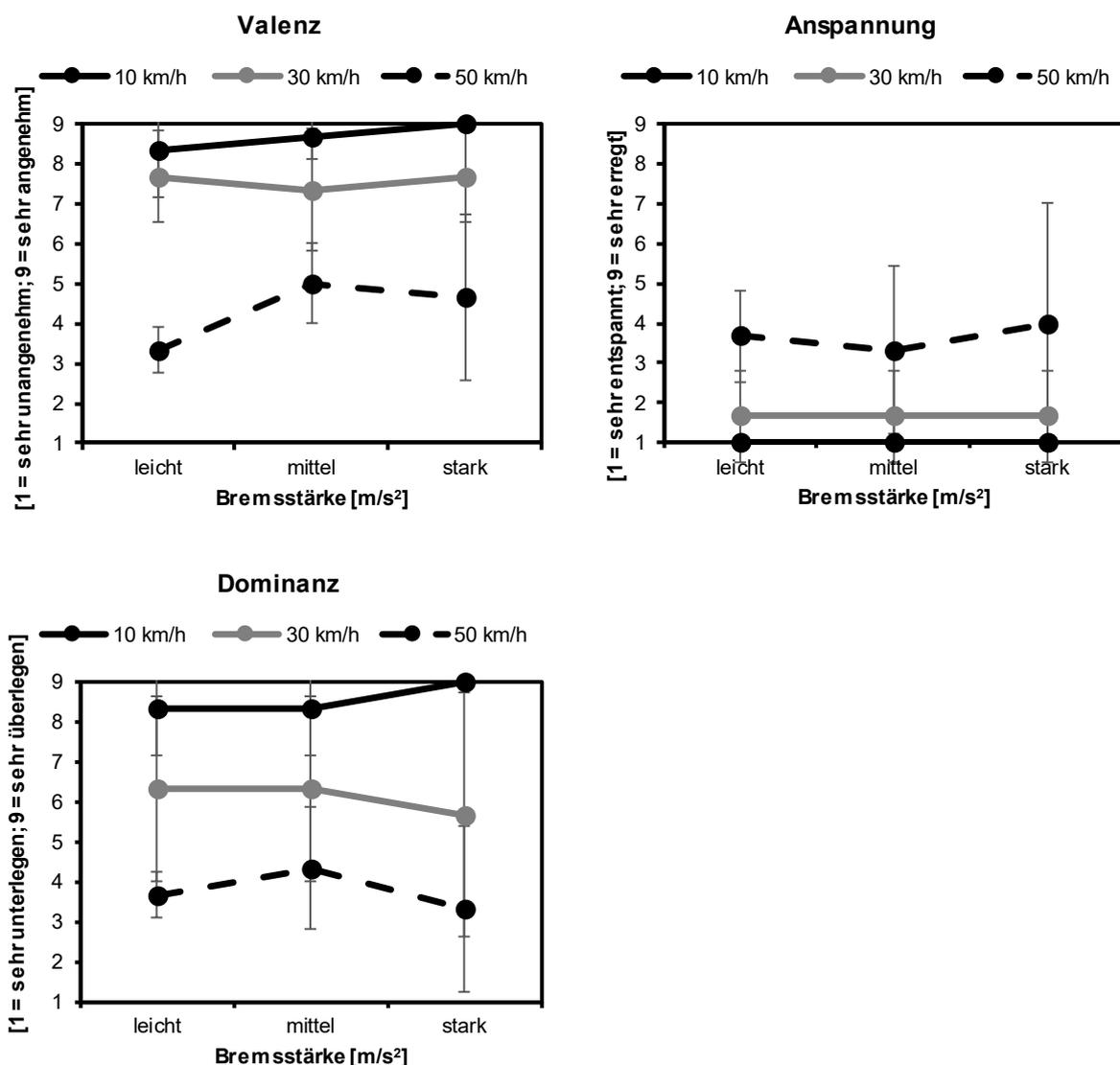


Abbildung 32: Mittlere Bewertungen der Probanden aus Radfahrersicht auf den drei Dimensionen (Valenz, Anspannung, Dominanz) der SAM Skala.

4.3.5.3 Zusammenfassung und Ausblick

Die Fahrsimulatorstudie hatte das Ziel, eine geeignete Befragungsmethodik zur Erfassung des erlebten Risikos menschlicher Verkehrsteilnehmer in der Interaktion mit automatisierten Fahrzeugen zu entwickeln und zu validieren. Dazu wurden verschiedene Messinstrumente (sprachfrei, sprachgebunden) miteinander verglichen.

Sowohl aus der Innensicht als auch aus der Außensicht bilden beide Messinstrumente die Varianz des erlebten Risikos menschlicher Verkehrsteilnehmer sehr gut ab. Dabei waren die Ergebnisse der beiden Messinstrumente hinsichtlich der Einordnung der einzelnen Interaktionen auf den beiden Ratingskalen ähnlich. Die Ergebnisse der drei Dimensionen des SAM fielen sehr ähnlich aus, sodass es redundant erscheint, alle drei Dimensionen zu erfassen. Da die verbale Risikoskala bevorzugt wurde und zumindest bei der Innensicht auch besser differenzierte, erschien es sinnvoll, die weiteren Studien

mit der verbalen Risikoskala durchzuführen. Auf der Risikoskala lagen die mittleren Bewertungen zwischen den Skalenpunkten 4 („sehr unangenehm“) und 5 („wenig gefährlich“).

Inhaltlich zeigte sich aus der Innensicht ein deutlicher Zusammenhang mit der Verzögerungsstärke. Je höher diese ausfiel, umso riskanter wurde das Verhalten des automatisierten Fahrzeugs bewertet. Dies war besonders stark bei der geringen Geschwindigkeit von 10 km/h ausgeprägt, bei der das Fahrzeug erst bei 3.4 m Entfernung zum Radfahrer bremste. Die sehr starke Verzögerung erschien bei allen Geschwindigkeiten als nicht angenehm und nahe am riskanten Fahren. Insgesamt erschien die Geschwindigkeit von 30 km/h am wenigsten unangenehm, insbesondere bei leichter oder mittlerer Verzögerung.

Bei der Außensicht erschien die Grundgeschwindigkeit als wesentlicher als die Verzögerungsstärke. Dabei wurde die Geschwindigkeit von 50 km/h als weniger angenehm bewertet. Bei 30 km/h wurden die mittlere und stärkere Verzögerung besser bewertet als die schwache, vermutlich, weil dies von außen schlechter zu erkennen war. Insgesamt wäre vom erlebten Risiko damit nach diesen Ergebnissen in dieser Anfahrtsituation eine Grundgeschwindigkeit von 30 km/h mit einer mittleren Verzögerung bei einem Abstand von ca. 12 m zu empfehlen, weil dies aus beiden Perspektiven akzeptabel und wenig riskant erscheint.

Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass alle Varianten zumindest im Mittelwert von der Bewertung her unterhalb des Bereichs „gefährlich“ lagen. Damit wären alle Varianten noch für die Mitfahrer und für Radfahrer akzeptabel.

Im Hinblick auf die weiteren Probandenstudien stellt sich die Frage, wo die Grenze zwischen noch akzeptiertem automatisierten Fahrverhalten aus Sicht menschlicher Verkehrsteilnehmer zu verorten ist. Darf ein automatisiertes Fahrzeug überhaupt ein „gefährliches“ Fahrverhalten zeigen, welches gleichzeitig von Menschen im Straßenverkehr akzeptiert wird? Oder verläuft die Grenze im Übergang vom „unangenehmen“ Verhalten zum „gefährlichen“ Verhalten? Diese Frage ist nach dieser Studie noch ungeklärt. Die Thematik des Grenzzrisikos wird in den folgenden Probandenstudien näher beleuchtet. Eine denkbare Möglichkeit wäre, die Grenze zwischen den Kategorien „unangenehm“ zu „gefährlich“ zu ziehen (siehe Abbildung 33). Der unangenehme Bereich entspricht dann eher dem Zustand einer Beanspruchungsoptimierung, bei dem der Mitfahrer kein Risiko erlebt. Bewertungen in diesem Bereich untermauern entsprechend die Zero Risk Theory (Näätänen, & Summala, 1974, 1976; Summala, 1988), die davon ausgeht, dass Fahrer Risiken kontrollieren bzw. vermeiden, um kein Risiko zu erleben. Demgegenüber sprechen Bewertungen im „gefährlichen“ Bereich für die Risikohomöostase (Wilde 1982), bei der Fahrer ein Ziellevel an erlebtem Risiko anstreben, und versuchen, dieses zu halten.

Diese Möglichkeit wäre anhand der sprachgebundenen Skala leicht umzusetzen. Die Verkehrsteilnehmer nehmen bei der Beantwortung der Risikoskala eine klare Einordnung in die Kategorien „harmlos“, „unangenehm“, „gefährlich“ oder „nicht akzeptabel“ mit den entsprechenden Verfeinerungen vor.

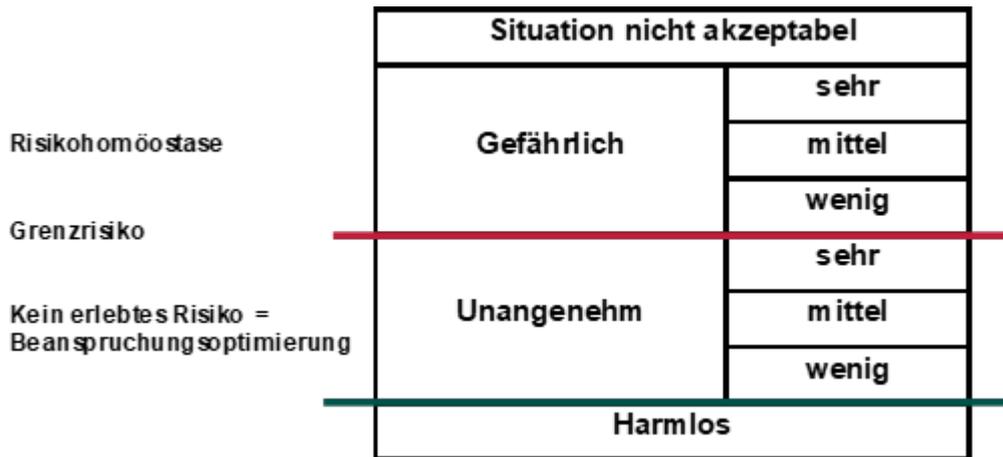


Abbildung 33: Risikoskala mit Vorortung des Grenzrisikos.

Das ist ein wesentlicher Vorteil der sprachgebundenen Risikoskala gegenüber der sprachfreien SAM Skala. Bei der sprachfreien SAM Skala bleibt unklar, welche Bedeutung ein numerischer Wert von beispielweise 2 oder 3 hat. Hier sind nur die Extrempunkte der Skala benannt. Somit ist neben der schwierigen Verständlichkeit der Skala auch die inhaltliche Interpretation der Antworten hinsichtlich eines Grenzrisikos problematisch.

Von der methodischen Vorgehensweise her blieb die zentrale Frage offen, ob eine Fragebogenbefragung nach einer erlebten Situation allein ausreichend ist, um das erlebte Risiko umfassend zu ermitteln. Vor diesem Hintergrund wird für die folgenden Studien eine weitere Messmethodik für das erlebte Risiko über ein Verhaltensmaß erwogen, welches in der Situation (= „online“) und nicht, wie bei Fragebogendaten, nach der jeweiligen Situation erfasst wird.

Ein solches Verhaltensmaß könnte gemessen werden, indem die Probanden per Knopfdruck zu einem aus ihrer Sicht idealen und zu einem für sie gerade noch akzeptablem Zeitpunkt eine Bremsung des automatisierten Fahrzeugs einleiten. Dies kann sowohl aus der Innensicht als auch aus der Außensicht umgesetzt werden, was einen Vergleich der beiden Perspektiven ermöglicht. Über die zeitliche Verteilung der per Knopfdruck eingeleiteten Bremsungen kann ermittelt werden, zu welchen Zeitpunkten ein automatisiertes Fahrzeug im Mittel beginnen sollte, zu bremsen und wo die Grenze zwischen dem aus subjektiver Sicht akzeptablem und inakzeptablem Risiko – also das subjektive Grenzrisiko – liegt.

4.3.6 Zusammenfassung

In dieser Studie wurde eine Methodik zur Erfassung des erlebten Risikos entwickelt. Diese wurde validiert, indem gezielt Verhaltensweisen des automatisierten Fahrens variiert wurden. Gerade die verbale Kategorienskala erwies sich als sehr gut geeignet zur Beschreibung des Erlebens. Es zeigte sich auch, dass für die Annäherung an das gerade akzeptable Grenzrisiko eine Erweiterung der Methodik sinnvoll erschien, bei der die Probanden einerseits ein für sie optimales Verhalten selbst auswählen sollten, andererseits ein gerade noch akzeptables Verhalten. Dies ermöglicht die Definition eines Grenzrisikos und beantwortet gleichzeitig die Frage, welches Ausmaß an Risiko für

Probanden akzeptabel erscheint. Mithilfe der Ergebnisse dieser Studie kann zukünftig vom erlebten Risiko der Probanden auf die Parametrierung der automatisierten Fahrfunktion geschlossen werden. Diese Kopplung zwischen dem erlebten Risiko und den Parametern der Fahrfunktion ermöglicht die explizite Berücksichtigung des Empfindens der Probanden bei der Entwicklung der Fahrfunktion. Damit waren die Voraussetzung für die empirischen Studien im Fahrsimulator hergestellt.

5 Ergebnisse der empirischen Untersuchungen

5.1 Studie 1: Erlebtes Risiko von Mitfahrern auf einer geraden Hauptstraße (TUBS)

Die Studie soll Erkenntnisse darüber liefern, wie Mitfahrer im hochautomatisierten Fahrzeug in der Interaktion mit einem Fußgänger als schwächerem Verkehrsteilnehmer gefahren werden möchten. Hierbei stellen sich die folgende Forschungsfragen:

- Wie verändert sich das erlebte Risiko und der Fahrkomfort von Mitfahrern in der Interaktion mit einem Fußgänger in Abhängigkeit von verschiedenen Auslegungen der automatisierten Fahrfunktion?
- Wie möchten menschliche Fahrer in der Interaktion mit einem Fußgänger idealerweise gefahren werden?

5.1.1 Methodik

Die Studie bestand aus zwei Versuchsteilen. Im ersten Versuchsteil wurden die Probanden als Mitfahrer automatisiert gefahren. Im zweiten Versuchsteil sollten die Probanden in vier ausgewählten Varianten des Fahrszenarios selbst, also manuell, so fahren, wie sie es sich von der Automation in dieser Fahrsituation wünschen würden.

5.1.1.1 Versuchsplan

Im ersten Teil der Fahrsimulatorstudie wurden vier Einflussgrößen variiert: (1) Die Geschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs (50 km/h / 30 km/h), welche der jeweils zulässigen Höchstgeschwindigkeit entsprach, (2) das Vorhandensein einer Fußgängerin hinter einem parkenden Auto auf dem Parkstand rechts (mit / ohne Fußgängerin), (3) das Vorhandensein von Gegenverkehr (mit / ohne Gegenverkehr) sowie (4) der laterale Versatz im eigenen Fahrstreifen (links / ohne / rechts). Der laterale Versatz, den das automatisierte Fahrzeug im eigenen Fahrstreifen fuhr, ist eine Abweichung des Fahrzeugmittelpunkts um 0.5 m vom Fahrstreifenmittelpunkt nach links bzw. nach rechts.

Alle Variationen der vier Einflussgrößen wurden vollständig miteinander kombiniert. Alle Probanden erlebten alle 24 Variationen. Um Reihenfolgeneffekte zu vermeiden, wurde die Reihenfolge der Variationen innerhalb des jeweiligen Straßentyps mittels lateinischer Quadrate permutiert. Zusätzlich zur Variation der vier Einflussgrößen wurde in sechs ausgewählten Varianten des Fahrszenarios eine Verzögerung des automatisierten Fahrzeugs als Reaktion auf die Verkehrssituation umgesetzt. Die Stärke der Verzögerung lag bei circa 1 m/s^2 ; dieser Wert entspricht ungefähr der Bremsstärke, wenn ein Fahrer den Fuß vom Gaspedal nimmt. Diese sechs Varianten mit Verzögerung sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** blau markiert. Insgesamt erlebten die Probanden somit 30 (24 + 6) Varianten des Fahrszenarios. Um den Effekt der Verzögerung zu untersuchen, wurden die sechs Varianten mit Verzögerung mit den entsprechenden sechs identischen Varianten ohne Verzögerung verglichen.

Tabelle 6: Versuchsplan für den ersten Teil der Fahrsimulatorstudie mit den Einflussgrößen Geschwindigkeit, Versatz, Gegenverkehr und Fußgängerpräsenz.

		Gegenverkehr					
		Ja			Nein		
		Versatz					
		Links	Keiner	Rechts	Links	Keiner	Rechts
Fußgängerpräsenz	Geschwindigkeit						
Ja	30 km/h						
	50 km/h						
Nein	30 km/h						
	50 km/h						

Da im ersten Versuchsteil nur ausgewählte Ausprägungen zweier zentraler Fahrparameter der automatisierten Fahrfunktion (Geschwindigkeit, Lateraler Versatz im eigenen Fahrstreifen) präsentiert wurden, sollten die Probanden im zweiten Versuchsteil selbst so fahren, wie sie idealerweise von einem automatisierten Fahrzeug gefahren werden möchten. Somit erfüllt der zweite Versuchsteil einerseits den Zweck zu prüfen, ob mit der implementierten Fahrfunktion im ersten Versuchsteil überhaupt die aus Mitfahrersicht relevanten Aspekte automatisierten Fahrverhaltens in dieser Fahrsituation variiert wurden. Andererseits ermöglicht dieses Vorgehen, weitere relevante Fahrparameter automatisierten Fahrverhaltens zu identifizieren, die für den Fahrkomfort und das erlebte Risiko menschlicher Mitfahrer entscheidend sind, aber im Rahmen des ersten Versuchsteils nicht abgedeckt wurden.

Im zweiten Teil der Fahrsimulatorstudie absolvierten die Probanden insgesamt vier ausgewählte Varianten des bereits erlebten Fahr Szenarios, welche in Tabelle 7 in blau markiert sind. Es wurden die Einflussgrößen Gegenverkehr (vorhanden / nicht vorhanden) sowie die zulässige Höchstgeschwindigkeit (30 km/h / 50 km/h) variiert. In jeder der vier Varianten stand eine Fußgängerin auf dem Parkstand am rechten Fahrbahnrand. Da die Probanden selbst fuhren, bestimmten die Probanden selbst, ob sie einen lateralen Versatz fuhren. Diese Einflussgröße wurde somit zu einem Messwert.

Tabelle 7: Versuchsplan für den zweiten Versuchsteil der Fahrsimulatorstudie mit den variierten Einflussgrößen Gegenverkehr und Geschwindigkeit.

		Gegenverkehr	
		Ja	Nein
Fußgängerpräsenz	Geschwindigkeit		
Ja	30 km/h		
	50 km/h		
Nein	30 km/h		
	50 km/h		

5.1.1.2 Material und Geräte

In dieser Fahrsimulatorstudie wurden subjektive Messwerte mittels Fragebogen (erster Versuchsteil) und objektive Messwerte mittels Fahrdatenaufzeichnung (zweiter Versuchsteil) erhoben.

Im ersten Versuchsteil wurde die entwickelte Befragungsmethodik genutzt. Nach jeder Einzelfahrt wurde das erlebte Risiko der Mitfahrer mittels der 8-stufigen Risikoskala erfragt, die sich an die Skala zur Bewertung der Kritikalität von Fahr- und Verkehrssituationen von Neukum et al. (2008) anlehnt, und von Stange et al. (2020) modifiziert wurde. Weiterhin bewerteten die Probanden die Geschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs, den Abstand zu den Parkständen, zur Fußgängerin sowie zum Gegenverkehr jeweils auf einer 7-stufigen Likertskala von 1 (zu langsam / zu klein) bis 7 (zu schnell / zu groß) sowie den Fahrkomfort mittels vier Items auf einer 5-stufigen Likertskala von 1 (trifft gar nicht zu) bis 5 (trifft voll und ganz zu). Die Items wurden in Anlehnung an die Diskomfortskala (Siebert et al., 2013) formuliert. Die subjektiven Messwerte der Fragebogenbefragung sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Subjektive Messwerte der Fragebogenbefragung.

Dimension	Skala	Beschreibung
Erlebtes Risiko	1 = harmlos; 8 = nicht akzeptabel	Risikoskala
Geschwindigkeit	1 = zu langsam; 7 = zu schnell	“Das automatisierte Fahrzeug fuhr...”
Lateraler Abstand zu Parkständen	1 = zu klein; 7 = zu groß	“Der Abstand des automatisierten Fahrzeugs zu den Parkständen am rechten Fahrbahnrand war...”
Lateraler Abstand zur Fußgängerin*	1 = zu klein; 7 = zu groß	“Der Abstand des automatisierten Fahrzeugs zur Fußgängerin am rechten Fahrbahnrand war...”
Lateraler Abstand zum Gegenverkehr*	1 = zu klein; 7 = zu groß	“Der Abstand des automatisierten Fahrzeugs zum Gegenverkehr war...”
Vertrauen in die Automation	1 = trifft überhaupt nicht zu; 5 = trifft völlig zu	“Ich habe dem automatisierten System in der vorangegangenen Situation vertraut.”
Nachvollziehbarkeit	1 = trifft überhaupt nicht zu; 5 = trifft völlig zu	“Das Fahrverhalten des automatisierten Fahrzeugs in der vorangegangenen Situation war für mich nachvollziehbar.”
Selbst fahren	1 = trifft überhaupt nicht zu; 5 = trifft völlig zu	“In der vorangegangenen Situation wäre ich lieber selbst gefahren.”
Kontrollverlust	1 = trifft überhaupt nicht zu; 5 = trifft völlig zu	“Ich fühlte mich dem automatisierten Fahrzeug in der vorangegangenen Situation ausgeliefert.”

* Diese Fragen wurden nur bei entsprechender Präsenz eines Fußgängers oder Gegenverkehr gestellt.

Zum Abschluss des ersten Versuchsteils wurden die Probanden gefragt, welches Fahrverhalten des automatisierten Fahrzeugs in drei ausgewählten Fahrszenarien wünschenswert bzw. gefährlich wäre (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). In der ersten Variante war eine Fußgängerin auf dem Parkstand rechts präsent, aber kein Gegenverkehr (links). In der zweiten Variante war Gegenverkehr vorhanden, aber keine Fußgängerin auf dem Parkstand rechts (Mitte). In der dritten Variante waren sowohl eine Fußgängerin als auch Gegenverkehr vorhanden (rechts).

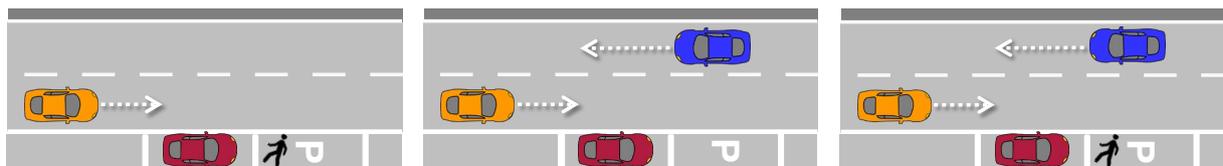


Abbildung 34: Ausgewählte Varianten des Fahr Szenarios in der Abschlussbefragung. Links: Variante mit Fußgängerpräsenz, ohne Gegenverkehr. Mitte: Variante mit Gegenverkehr, ohne Fußgänger. Rechts: Variante mit Fußgänger, mit Gegenverkehr.

Die Antwortoptionen der Nachbefragung sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zusammengefasst. Bei den abgefragten Verhaltensaspekten handelt es sich um eine Veränderung der Geschwindigkeit (Abbremsen, kein Abbremsen), und die Veränderung der lateralen Position des Ego-Fahrzeugs im eigenen Fahrstreifen durch das Fahren mit einem lateralen Versatz (links / ohne / rechts). Darüber hinaus hatten die Probanden die Möglichkeit, weitere Aspekte in einem offenen Antwortformat („sonstiges“) anzugeben. Die vollständigen Fragebögen befinden sich im Anhang.

Tabelle 9: Mögliche Verhaltensweisen automatisierter Fahrzeuge.

Verhaltensweise	Antwortoption
Wünschenswertes/ Gefährliches Fahrverhalten	Versatz nach links
	Versatz nach rechts
	Kein Versatz
	Abbremsen
	Kein Abbremsen
	Sonstiges (offene Antwort)

Im zweiten Versuchsteil wurde das Fahrverhalten der Probanden analysiert. Dazu wurden die Position, die Geschwindigkeit, und das Bremspedal des Ego-Fahrzeugs sowie die Position der Fußgängerin für jeden Messzeitpunkt der Simulatorfahrten aufgezeichnet. Die Fahrdaten wurden in einem Messtakt von 60 Hz aufgezeichnet.

Die analysierten Verhaltensaspekte sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Zum einen wurde die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs zu zwei Messpunkten aufgezeichnet: (1) zu Beginn der Fahrt, nachdem der Fahrer auf die Zielgeschwindigkeit beschleunigt hatte, (2) auf der Höhe der Fußgängerin. Zusätzlich wurde die Differenz der Geschwindigkeiten zwischen diesen beiden Messzeitpunkten als Indikator für die Veränderung der Geschwindigkeit berechnet. Die Veränderung der Geschwindigkeit zeigt indirekt an, ob Fahrer als Reaktion auf die Fahrsituation gebremst hat. Um diese Anpassung der Geschwindigkeit genauer zu analysieren, wurde zusätzlich erhoben, ob Fahrer gebremst haben (ja / nein), und wenn ja, wie stark sie bremsten (maximale Bremspedalstellung).

Zum anderen wurde die laterale Position des Ego-Fahrzeugs zu den beschriebenen zwei Messzeitpunkten aufgezeichnet. Auch hier wurde die Differenz der lateralen Position zwischen den zwei Messzeitpunkten als Indikator für die Veränderung der lateralen Position berechnet. Die laterale Position im eigenen Fahrstreifen gibt Aufschluss darüber, ob ein Fahrer einen Versatz im eigenen Fahrstreifen als Reaktion auf die Fußgängerin am rechten Fahrbahnrand bzw. auf den Gegenverkehr gefahren ist.

Tabelle 10: Gemessene Fahrdaten und Beschreibung.

Messwert	Einheit	Beschreibung
Geschwindigkeit	km/h	Mittlere Geschwindigkeit zu Beginn des Szenarios, 70 m vor der Fußgängerin
Geschwindigkeit auf Höhe der Fußgängerin	km/h	Mittlere Geschwindigkeit auf Höhe der Fußgängerin
Maximale Bremsreaktion	-	Maximale Stellung des Bremspedals
Bremsen	Ja/Nein	Haben Probanden im analysierten Bereich gebremst?
Laterale Position im eigenen Fahrstreifen	m	Mittlere laterale Abweichung von der Fahrstreifenmitte zu Beginn des Szenarios, 70 m vor der Fußgängerin
Laterale Position im eigenen Fahrstreifen auf Höhe der Fußgängerin	m	Laterale Abweichung von der Fahrstreifenmitte auf der Höhe der Fußgängerin

5.1.1.3 Durchführung

Nach der Begrüßung der Probanden gaben diese ihr Einverständnis zur Aufzeichnung und wissenschaftlichen Nutzung der Fragebogen- und Fahrdaten. Danach beantworteten die Probanden einen soziodemographischen Fragebogen. Anschließend wurden die Probanden mit der Funktionsweise des Fahrsimulators vertraut gemacht. Auf eine Trainingsfahrt wurde im ersten Versuchsteil verzichtet, da die Probanden das Fahrzeug nicht selbst steuerten, sondern automatisiert gefahren wurden. Die Probanden konnten nicht in die Fahraufgabe eingreifen, da die Pedalerie und das Lenkrad in diesem Teil der Studie nicht funktionsfähig waren. Während der Simulatorfahrten hatten die Probanden die Aufgabe, die Fahrumgebung und den Straßenverkehr sowie das Verhalten der Automation zu beobachten, während die Automation die Fahraufgabe vollständig übernahm. Während der automatisierten Fahrt hatten Probanden keine Nebenaufgaben. Nach jeder Einzelfahrt beantworteten die Probanden einen Fragebogen, welcher eine Bewertung des erlebten Risikos und des Fahrkomforts während der Fahrt sowie eine Bewertung des automatisierten Fahrverhaltens beinhaltete. Nachdem die Probanden alle 30 Variationen des Fahr Szenarios erlebt hatten, beantworteten die Probanden die Abschlussbefragung.

Anschließend folgte ein zweiter Versuchsteil, in dem die Probanden manuell fuhren. Dazu absolvierten die Probanden eine Trainingsfahrt (5 Minuten), um sich an das Fahren im Simulator zu gewöhnen. Anschließend absolvierten sie vier ausgewählte Varianten des Fahr Szenarios, welches sie zuvor als Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug erlebt hatten. Die Aufgabe der Probanden war, manuell so zu fahren, wie sie es sich von einem automatisierten Fahrzeug in der jeweiligen Situation idealerweise wünschten. Im Anschluss an die vier manuellen Simulatorfahrten erhielten die Probanden ihre Aufwandsentschädigung und wurden verabschiedet. Die vollständigen Instruktionen befinden sich im Anhang.

Die vollständigen Fragebögen und Instruktionen zur Fahrsimulatorstudie befinden sich im Anhang. Jede Testung dauerte circa 90 bis 120 Minuten.

5.1.1.4 Stichprobe

An der Studie nahmen 32 Probanden (16 weiblich) im Alter von 18 bis 85 Jahren ($M = 38.4$ Jahre; $SD = 17.8$ Jahre) teil. Im Durchschnitt besaßen die Probanden ihren Führerschein seit 21 Jahren ($SD = 17.6$ Jahre) und 57 % fuhren mindestens mehrmals in der Woche selbst Auto.

Die Technikaffinität der Probanden lag bei $M = 3.88$ ($SD = 0.99$) auf einer 6-stufigen Skala (ATI Skala; Franke et al., 2019). 26 (81.3 %) Probanden gaben an, Erfahrungen mit Fahrerassistenzsystemen zu haben.

Bei der Frage, ob die Vorstellung von einem automatisierten Fahrzeug gefahren zu werden, unangenehm ist, war die Hälfte der Probanden unentschlossen. Weitere 6 (18.8 %) Probanden gaben an, dass sie die Vorstellung eher oder sehr unangenehm finden. 10 (31.3 %) Probanden gaben an, dass sie die Vorstellung eher nicht oder gar nicht unangenehm finden.

Bei der Frage, ob es schwierig ist, die Kontrolle an ein automatisiertes Fahrzeug abzugeben, waren die Probanden ebenso geteilter Meinung, wie Abbildung 35 zeigt.

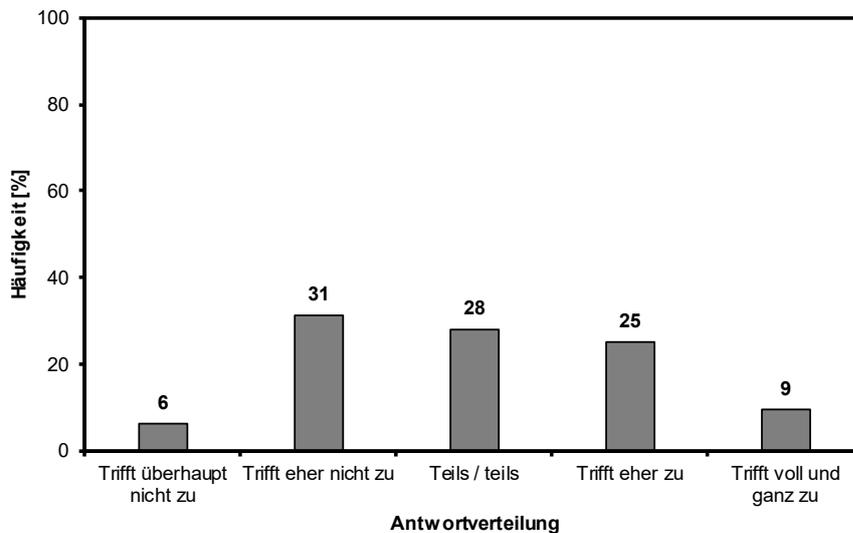


Abbildung 35: Antwortverteilung hinsichtlich der Frage, ob es als Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug schwierig ist, die Kontrolle an das Fahrzeug abzugeben.

Die große Mehrheit der Probanden hatte bereits Erfahrung im Fahrsimulator gesammelt. 6 (18.8 %) Probanden waren vor der Studie bereits einmal gefahren, und 24 (75.0 %) Probanden mehr als einmal. Nur 2 (6.3 %) Probanden hatten bislang keine Erfahrung im Fahrsimulator.

Die Studie wurde im statischen Fahrsimulator an der TU Braunschweig im Oktober 2019 durchgeführt. Eine Voraussetzung für die Teilnahme an der Studie war ein Führerschein Klasse B. Probanden, welche eine Sehhilfe benötigen, trugen diese während der Fahrt im Fahrsimulator.

5.1.2 Ergebnisse: Fragebogendaten

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Fragebogenbefragung für jede abhängige Variable dargestellt. Anschließend folgen die Ergebnisse der Fahrdatenanalyse.

5.1.2.1 Erlebtes Risiko

Bei der Frage, wie risikoreich die Simulatorfahrten aus Mitfahrersicht waren, ergab die vier-faktorielle Varianzanalyse eine signifikante Wechselwirkung zwischen den Einflussgrößen Fußgängerpräsenz, Lateraler Versatz und Gegenverkehr (siehe Tabelle 11) sowie zweifache Wechselwirkungen zwischen den Faktoren Lateraler Versatz und Gegenverkehr und den Einflussgrößen Lateraler Versatz und Fußgängerpräsenz. Weiterhin zeigten sich signifikante Hauptwirkungen aller vier untersuchten Einflussgrößen auf das erlebte Risiko der Mitfahrer. Die vollständigen Ergebnisse der Varianzanalyse sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf das erlebte Risiko von Mitfahrern im hochautomatisierten Fahrzeug. Dargestellt sind die F- und p-Werte der Varianzanalyse, die zugehörigen Freiheitsgrade (df) und die Schätzung der Effektgröße.

	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>p</i>	η^2_{par}
Geschwindigkeit (V)	26.8	1,31	< .001	.46
Lateraler Versatz (L)	25.8	2,62	< .001	.45
Gegenverkehr (G)	32.0	1,31	< .001	.51
Fußgängerpräsenz (F)	14.1	1,31	< .001	.31
V x L	1.2	2,62	.311	
V x G	0.3	1,31	.567	
V x F	2.3	1,31	.136	
L x G	56.1	2,62	< .001	.64
L x F	4.7	2,62	.012	.13
G x F	0.1	1,31	.807	
V x L x G	1.1	2,62	.338	
V x L x F	1.6	2,62	.213	
G x L x F	4.6	1,7,51.9	.020	.13
V x F x G	3.5	1,31	.073	
V x G x L x F	0.1	1,7,52.3	.956	

Wie in Abbildung 36 links und rechts dargestellt ist, liegen die mittleren Bewertungen der Mitfahrer in der unteren Hälfte der Risikoskala zwischen den Skalenpunkten 1 (= harmlos) und 5 (= wenig gefährlich), wobei das Fahren ohne lateralen Versatz im eigenen Fahrstreifen aus Mitfahrersicht am sichersten ist. Über beide Abbildungen hinweg wird deutlich, dass die Anwesenheit eines Fußgängers (gestrichelte Linien) zu etwas höheren Risikobewertungen führt als dieselbe Situation ohne Fußgänger (durchgezogene Linien). Diese Hauptwirkung ist also zu interpretieren, wobei der Effekt nicht sehr stark ist.

Der Gegenverkehr insgesamt hat nach der Grafik keine einheitliche Wirkung auf die Risikobewertung. Die entsprechende Hauptwirkung ist also nicht zu bewerten. Ebenso führt der laterale Versatz zu unterschiedlichen Effekten, wobei hier noch die Richtung des Versatzes wichtig ist.

Betrachtet man zunächst den lateralen Versatz nach links, so wird deutlich, dass dieser nur bei Anwesenheit von Gegenverkehr zu einer erhöhten Risikobewertung führt. Ist kein Gegenverkehr vorhanden, so führt ein lateraler Versatz nach links bei Anwesenheit eines Fußgängers zu einer etwas geringeren Risikobewertung als kein lateraler Versatz bei Anwesenheit eines Fußgängers. Ein lateraler Versatz nach links erscheint damit bei Anwesenheit eines Fußgängers ohne Gegenverkehr als sinnvoll, bei Anwesenheit des Gegenverkehrs allerdings eher risikoerhöhend.

Ein lateraler Versatz nach rechts wird dagegen in allen Kombinationen als etwas risikoreicher bewertet. Vor allem wenn kein Gegenverkehr und kein Fußgänger

vorhanden ist (durchgezogene schwarze Linie) führt dies zu einer erhöhten Risikobewertung, wobei hier die Anwesenheit des geparkten Fahrzeugs eine Rolle spielen könnte. Ein lateraler Versatz bei Gegenverkehr ohne Anwesenheit eines Fußgängers führt zu einer etwas geringeren Risikobewertung als ohne Gegenverkehr. Jedoch liegt die Risikobewertung auch dann noch höher als ohne lateralen Versatz. Damit erscheint es insgesamt nicht sinnvoll, bei Anwesenheit von Gegenverkehr einen lateralen Versatz nach rechts zu fahren.

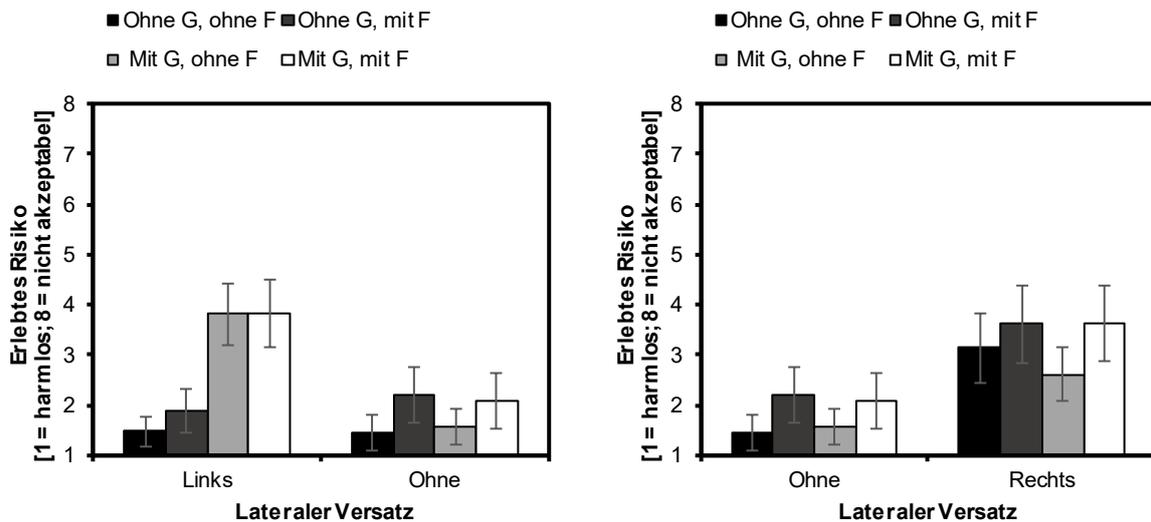


Abbildung 36: Erlebtes Risiko der Mitfahrer (Mittelwerte mit 95% Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgrößen Gegenverkehr (G), Fußgängerpräsenz (F) und ohne bzw. mit lateralem Versatz (L). Links sind die Teilergebnisse für den lateralen Versatz nach links dargestellt, auf der rechten Seite für den lateralen Versatz nach rechts.

Weiterhin ergab die vier-faktorielle Varianzanalyse eine signifikante Hauptwirkung der gefahrenen Geschwindigkeit auf das erlebte Risiko der Mitfahrer im hochautomatisierten Fahrzeug (siehe Abbildung 37). Allerdings liegen die Mittelwerte bei beiden Geschwindigkeiten in der unteren Hälfte der Risikoskala zwischen den Skalenpunkten 2 (= wenig unangenehm) und 3 (= mittel unangenehm). Der Unterschied zwischen den beiden Geschwindigkeiten beträgt somit weniger als einen Skalenpunkt. Somit zeigt dieses Ergebnis, dass auch eine höhere Geschwindigkeit von 50 km/h aus Mitfahrersicht im akzeptablen Bereich liegt. Zu beachten ist hierbei, dass mit den beiden Geschwindigkeiten 30 km/h und 50 km/h jeweils die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten auf den Streckenabschnitten regelkonform eingehalten wurden. Somit liegt die Regelkonformität hinsichtlich der Geschwindigkeit im akzeptablen Bereich.

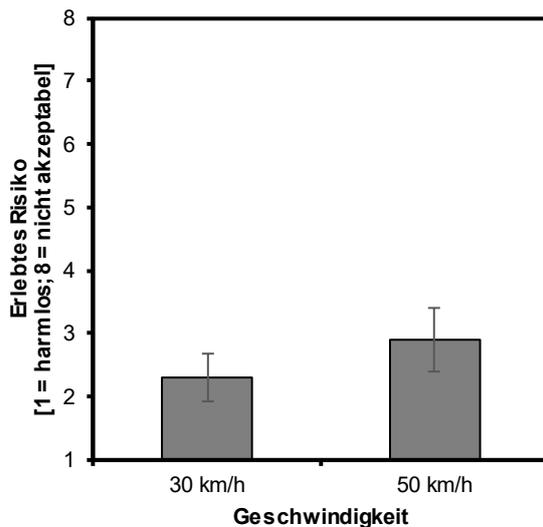


Abbildung 37: Erlebtes Risiko der Mitfahrer (Mittelwerte mit 95% Vertrauensintervall) in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (V).

Bei der Frage, inwieweit eine Verzögerung des automatisierten Fahrzeugs das erlebte Risiko beeinflusst, ergab die zweifaktorielle Varianzanalyse weder eine signifikante Hauptwirkung der Verzögerung auf das erlebte Risiko ($F(1,31) = 3.19, p = .084$), noch eine Wechselwirkung mit dem lateralen Versatz ($F(1.8,55.9) = 0.1, p = .905$). Jedoch zeigte sich eine signifikante Hauptwirkung der Einflussgröße Lateraler Versatz ($F(1,31) = 8.83, p < .001, \eta^2_{\text{par}} = .22$). Paarweise Vergleiche zeigten, dass ein lateraler Versatz nach rechts signifikant risikoreicher bewertet wurde ($M = 2.51$), als ein lateraler Versatz nach links ($M = 1.76$) bzw. das Fahren ohne lateralen Versatz im eigenen Fahrstreifen ($M = 1.91$).

Insgesamt ist damit für das erlebte Risiko aus Mitfahrersicht festzuhalten:

- Das Fahren ohne lateralen Versatz im eigenen Fahrstreifen ist auf Mitfahrersicht am wenigsten unangenehm und risikoreich.
- Ein lateraler Versatz um 0.5 m nach links ist akzeptabel, wenn gleichzeitig kein Gegenverkehr vorhanden ist.
- Bei Anwesenheit eines Fußgängers ohne Gegenverkehr könnte daher ein lateraler Versatz nach links gewählt werden, um das erlebte Risiko von Mitfahrern zu verringern. Mit Gegenverkehr erscheint dies dagegen kontraproduktiv.
- Ein lateraler Versatz nach rechts erscheint in jedem Fall risikoreicher, da es selbst ohne Fußgängerpräsenz auf der rechten Seite vermutlich wegen des geparkten Fahrzeugs risikoreicher erscheint, dicht an diesem vorbeizufahren.
- Ein lateraler Versatz nach rechts bei Gegenverkehr erscheint damit nicht sinnvoll, selbst wenn kein Fußgänger vorhanden ist.
- Eine zusätzliche Verzögerung von rund 1.0 m/s^2 verändert diese Bewertung nicht. Dies scheint zumindest aus Mitfahrersicht nicht notwendig zu sein, um das erlebte Risiko zu verringern.
- Hinsichtlich der Geschwindigkeit zeigte sich, dass das Fahren der jeweils zulässigen Höchstgeschwindigkeiten (30 km/h / 50 km/h) bei den einzelnen Fahrten im akzeptablen Bereich liegt.

- Dabei bestätigte sich, dass höhere Geschwindigkeiten als risikoreicher erlebt werden als niedrigere Geschwindigkeiten.

Um eine möglichst geringe Risikobewertung zu erhalten, ist damit folgende Anpassung der Automation bei Anwesenheit eines Fußgängers am rechten Fahrbahnrand zu empfehlen:

- Es sollte ein lateraler Versatz von 0.5 m nach links gefahren werden, allerdings nur dann, wenn kein Gegenverkehr vorhanden ist.
- Wenn es möglich ist, langsamer zu fahren (30 km/h) führt dies insgesamt zu einer geringeren Risikobewertung als bei 50 km/h.

5.1.2.2 Vertrauen in Automation

Hinsichtlich des Vertrauens der Mitfahrer in die automatisierte Fahrfunktion ergab die vier-faktorielle Varianzanalyse zwei signifikante Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen Gegenverkehr und lateraler Versatz (siehe Abbildung 38 links) sowie zwischen Fußgängerpräsenz und lateralem Versatz (siehe Abbildung 38 rechts). Darüber hinaus hatten alle untersuchten Einflussgrößen signifikante Hauptwirkungen auf das Vertrauen in Automation. Die Ergebnisse der Varianzanalysen sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf das Vertrauen von Mitfahrern im hochautomatisierten Fahrzeug. Dargestellt sind die F- und p-Werte der Varianzanalyse, die zugehörigen Freiheitsgrade (df) und die Schätzung der Effektgröße.

	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>p</i>	η^2_{par}
Geschwindigkeit (V)	17.7	1,31	<.001	.52
Lateraler Versatz (L)	26.3	2,62	<.001	.46
Gegenverkehr (G)	32.9	1,31	<.001	.51
Fußgängerpräsenz (F)	7.9	1,31	.008	.20
V x L	0.6	2,62	.542	
V x G	0.02	1,31	.898	
V x F	2.7	1,31	.108	
L x G	41.2	2,62	<.001	.57
L x F	5.5	2,62	.007	.15
G x F	1.6	1,31	.213	
V x L x G	0.2	2,62	.982	
V x L x F	0.8	2,62	.542	
G x L x F	0.4	2,62	.662	
V x F x G	0.9	1,31	.327	
V x G x L x F	0.14	1.8,56.1	.846	

Wie in Abbildung 38 links dargestellt wird, war das Vertrauen aus Mitfahrersicht am höchsten ausgeprägt, wenn das automatisierte Fahrzeuge ohne lateralen Versatz im eigenen Fahrstreifen fuhr. Die mittleren Bewertungen lagen mit und ohne Gegenverkehr bei 4. Ein lateraler Versatz nach links war ähnlich vertrauenswürdig, allerdings nur, wenn gleichzeitig kein Gegenverkehr vorhanden war. Bei Gegenverkehr war dieses Fahrverhalten für die Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug wenig vertrauenswürdig. In diesem Fall liegt es nahe, dass Mitfahrer nicht zu dicht am Gegenverkehr fahren möchten. Ein Versatz nach rechts zu fahren, ist aus Mitfahrersicht ebenso wenig vertrauenswürdig.

Hier streuen die mittleren Bewertungen mit und ohne Gegenverkehr um den Skalenpunkt 3, wobei dieses Fahrverhalten mit Gegenverkehr marginal vertrauenswürdiger ist als ohne Gegenverkehr.

Ein ähnliches Ergebnismuster zeigte sich bei der Wechselwirkung der beiden Einflussgrößen Lateraler Versatz und Fußgängerpräsenz (siehe Abbildung 38 rechts). Auch hier war das Vertrauen aus Mitfahrersicht am höchsten ausgeprägt, wenn das automatisierte Fahrzeug in der Mitte des Fahrstreifens fuhr, wobei die mittleren Bewertungen in der Bedingung ohne Fußgängerin höher ausfielen als mit Fußgängerpräsenz. Ein Versatz nach links war weniger vertrauenswürdig verglichen mit keinem Versatz, aber vertrauenswürdiger als ein Versatz nach rechts. Hier fielen die mittleren Bewertungen in den Bedingungen mit bzw. Fußgängerpräsenz fast identisch aus.

Am wenigsten nachvollziehbar war ein Versatz nach rechts. Hier fielen die mittleren Bewertungen in der Bedingung mit Fußgängerpräsenz jedoch marginal höher aus als in der Bedingung ohne Fußgängerpräsenz.

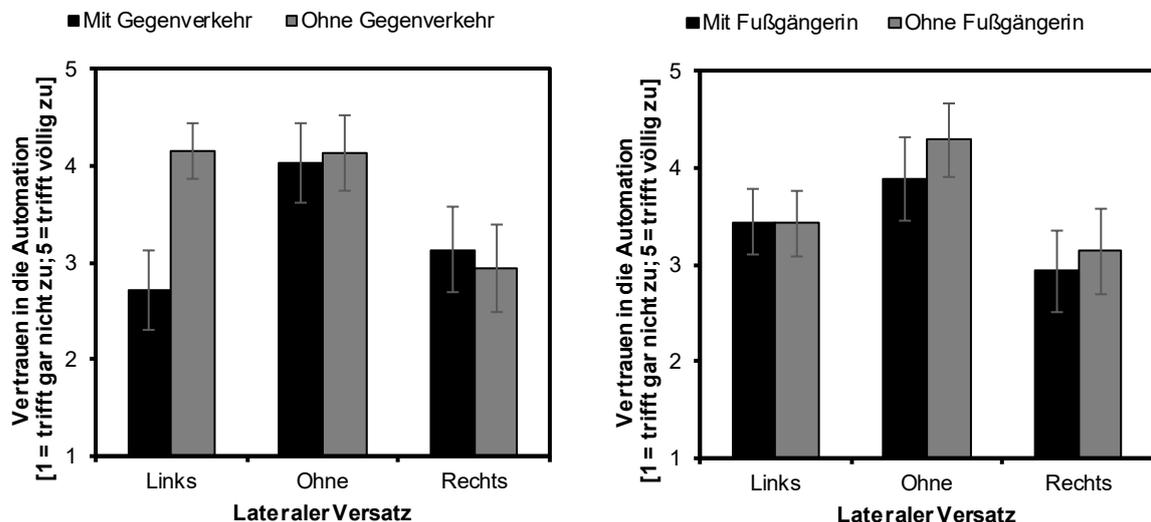


Abbildung 38: Links: Vertrauen der Mitfahrer in die Automation (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgrößen Gegenverkehr (G) und Lateraler Versatz (L). Rechts: Vertrauen der Mitfahrer in die Automation (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgrößen Fußgängerpräsenz (F) und Lateraler Versatz (L).

Die Hauptwirkung der gefahrenen Geschwindigkeit auf das Vertrauen der Mitfahrer in die Automation ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Das Vertrauen der Mitfahrer war bei niedriger Geschwindigkeit (30 km/h) signifikant höher als bei einer höheren Geschwindigkeit von 50 km/h ($M_{30 \text{ km/h}} = 3.67$, $M_{50 \text{ km/h}} = 3.37$). Allerdings ist der numerische Unterschied von 0.3 Skalenpunkten sehr gering und die Mittelwerte liegen beide im mittleren Bereich der Skala. Somit liegt das Vertrauen von Mitfahrern beim Fahren der zulässigen Höchstgeschwindigkeit nur im mittleren Bereich. Fraglich ist, ob sich das Vertrauen steigern lässt, indem das automatisierte Fahrzeug noch langsamer fährt.

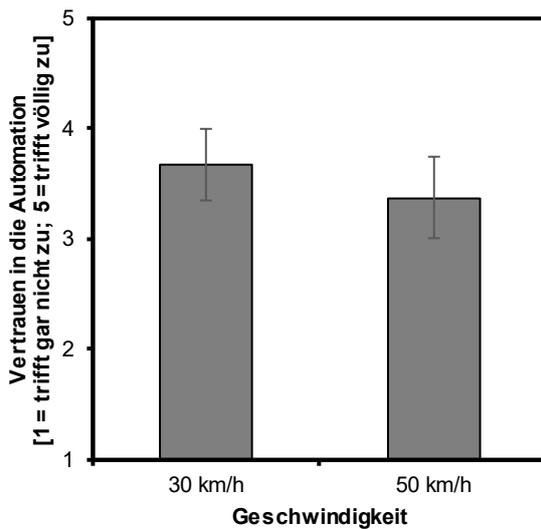


Abbildung 39: Vertrauen der Mitfahrer in die Automation (Mittelwerte mit 95% Vertrauensintervall) in Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit (V).

Bei der Frage, inwieweit eine Verzögerung des automatisierten Fahrzeugs das Vertrauen in die Automation beeinflusst, ergab die zweifaktorielle Varianzanalyse signifikante Hauptwirkungen der Verzögerung ($F(1,31) = 6.15, p = .019, \eta^2_{\text{par}} = .17$) und des lateralen Versatzes ($F(1,31) = 12.85, p < .001, \eta^2_{\text{par}} = .29$) sowie eine signifikante Wechselwirkung zwischen den beiden Einflussgrößen ($F(1,31) = 3.46, p = .038, \eta^2_{\text{par}} = .10$).

Wie in Abbildung 40 dargestellt wird, erhöht eine Verzögerung das Vertrauen in die Automation in den Bedingungen mit einem lateralen Versatz nach rechts bzw. ohne einen lateralen Versatz. Dieser Effekt tritt aber nur dann ein, wenn dieses nicht bereits sehr hoch ist wie bei einem lateralen Versatz nach links. Hier sind die Mittelwerte sowohl mit als auch ohne Verzögerung fast identisch hoch.

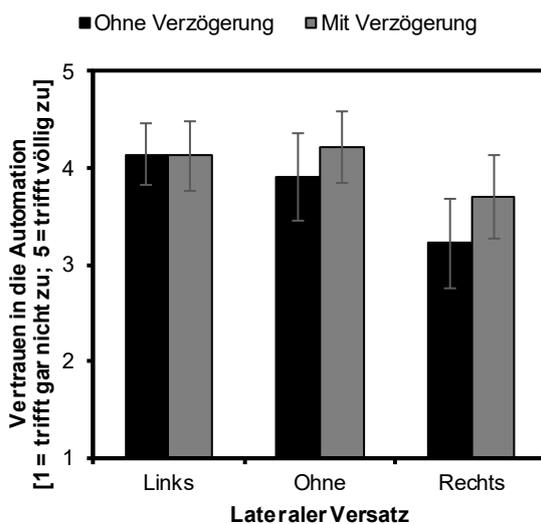


Abbildung 40: Vertrauen in die Automation mit bzw. ohne Verzögerung (Mittelwerte mit 95% Vertrauensintervall) in Abhängigkeit des lateralen Versatzes im eigenen Fahrstreifen (L).

Insgesamt ist damit für das Vertrauen in die Automation aus Mitfahrsicht festzuhalten:

- Das Vertrauen in die Automation ist aus Mitfahrsicht am höchsten ausgeprägt, wenn das automatisierte Fahrzeug ohne lateralen Versatz im eigenen Fahrstreifen fährt, und gleichzeitig kein Gegenverkehr und keine Fußgängerin auf dem rechten Parkstand vorhanden ist. Ebenso hoch ist das Vertrauen, wenn das automatisierte Fahrzeug einen lateralen Versatz nach links fährt, jedoch nur, wenn gleichzeitig kein Gegenverkehr vorhanden ist.
- Bei Gegenverkehr und Fußgängerpräsenz ist das Vertrauen in die Automation am höchsten, wenn ohne lateralen Versatz gefahren wird.
- Eine zusätzliche Verzögerung von rund 1.0 m/s^2 erhöht das Vertrauen in die Automation signifikant, wenn ohne lateralen Versatz oder mit lateralem Versatz nach rechts gefahren wird.
- Hinsichtlich der Geschwindigkeit zeigte sich, dass das Vertrauen beim Fahren der jeweils zulässigen Höchstgeschwindigkeit (30 km/h / 50 km/h) bei den einzelnen Fahrten im mittleren Bereich liegt.
- Das Vertrauen in Automation ist höher, wenn diese mit niedrigerer Geschwindigkeit fährt.

Um eine Fahrfunktion der Automation bei Anwesenheit eines Fußgängers anzupassen, um ein möglichst hohes Vertrauen in die Automation zu erreichen und gleichzeitig eine möglichst niedrige Risikobewertung zu erreichen, empfiehlt sich Folgendes:

- Bei Anwesenheit eines Fußgängers sollte kein lateraler Versatz nach links gefahren werden, sondern mit ca. 1 m/s^2 verzögert werden. Die Verzögerung erhöht das Vertrauen in die Automation, ohne die Risikobewertung zu erhöhen. Ein lateraler Versatz nach links ohne Gegenverkehr würde zwar die Risikobewertung verringern, gleichzeitig aber auch das Vertrauen in die Automation.

5.1.2.3 Nachvollziehbarkeit des automatisierten Fahrverhaltens

Bei der Frage, wie nachvollziehbar das automatisierte Fahrverhalten aus Mitfahrsicht war, ergab die vier-faktorielle Varianzanalyse zwei Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen Lateraler Versatz und Gegenverkehr sowie zwischen den Einflussgrößen Lateraler Versatz und Fußgängerpräsenz. Darüber hinaus hatten mit Ausnahme von Fußgängerpräsenz alle untersuchten Einflussgrößen signifikante Hauptwirkungen auf die Nachvollziehbarkeit des automatisierten Fahrverhaltens. Die vollständigen Ergebnisse der Varianzanalyse sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf die Nachvollziehbarkeit des hochautomatisierten Fahrverhaltens für Mitfahrer im hochautomatisierten Fahrzeug. Dargestellt sind die F- und p-Werte der Varianzanalyse, die zugehörigen Freiheitsgrade (df) und die Schätzung der Effektgröße.

	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>p</i>	η^2_{par}
Geschwindigkeit (V)	21.9	1,31	< .001	.41
Lateraler Versatz (L)	40.3	2,62	< .001	.57
Gegenverkehr (G)	30.4	1,31	< .001	.50
Fußgängerpräsenz (F)	1.0	1,31	.325	
V x L	0.4	2,62	.714	
V x G	.04	1,31	.843	
V x F	1.5	1,31	.226	
L x G	46.3	2,62	< .001	.60
L x F	10.1	2,62	< .001	.25
G x F	1.4	1,31	.253	
V x L x G	0.3	2,62	.729	
V x L x F	0.9	2,62	.426	
G x L x F	1.6	2,62	.205	
V x F x G	.04	1,31	.849	
V x G x L x F	0.6	2,62	.568	

Wie Abbildung 41 links zeigt, war das Fahren ohne lateralen Versatz sowohl mit und ohne Gegenverkehr am besten nachvollziehbar. Die mittleren Bewertungen der Nachvollziehbarkeit lagen mit und ohne Gegenverkehr bei 4. Ein lateraler Versatz nach links war ähnlich nachvollziehbar, allerdings nur, wenn gleichzeitig kein Gegenverkehr vorhanden war. Bei Gegenverkehr war dieses Fahrverhalten für die Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug wenig nachvollziehbar. In diesem Fall liegt es nahe, dass Mitfahrer nicht zu dicht am Gegenverkehr fahren möchten. Ein Versatz nach rechts zu fahren, ist aus Mitfahrersicht ebenso wenig nachvollziehbar. Hier liegen die mittleren Bewertungen mit und ohne Gegenverkehr zwischen den Skalenpunkten 2 und 3, wobei dieses mit Gegenverkehr weniger nachvollziehbarer war als ohne Gegenverkehr.

Abbildung 41rechts zeigt die Wechselwirkung der beiden Einflussgrößen Lateraler Versatz und Fußgängerpräsenz. Auch hier war das Fahren in der Mitte des Fahrstreifens aus Mitfahrersicht am besten nachvollziehbar, wobei die mittleren Bewertungen in der Bedingung ohne Fußgängerin höher ausfielen als mit Fußgängerpräsenz. Ein Versatz nach links war weniger nachvollziehbar verglichen mit keinem Versatz, aber nachvollziehbarer als ein Versatz nach rechts. Hier fielen die mittleren Bewertungen in der Bedingung mit Fußgängerpräsenz jedoch höher als in der Bedingung ohne Fußgängerpräsenz. Am wenigsten nachvollziehbar war ein Versatz nach rechts. Hier waren die mittleren Bewertungen in den Bedingungen mit bzw. ohne Fußgängerpräsenz fast identisch.

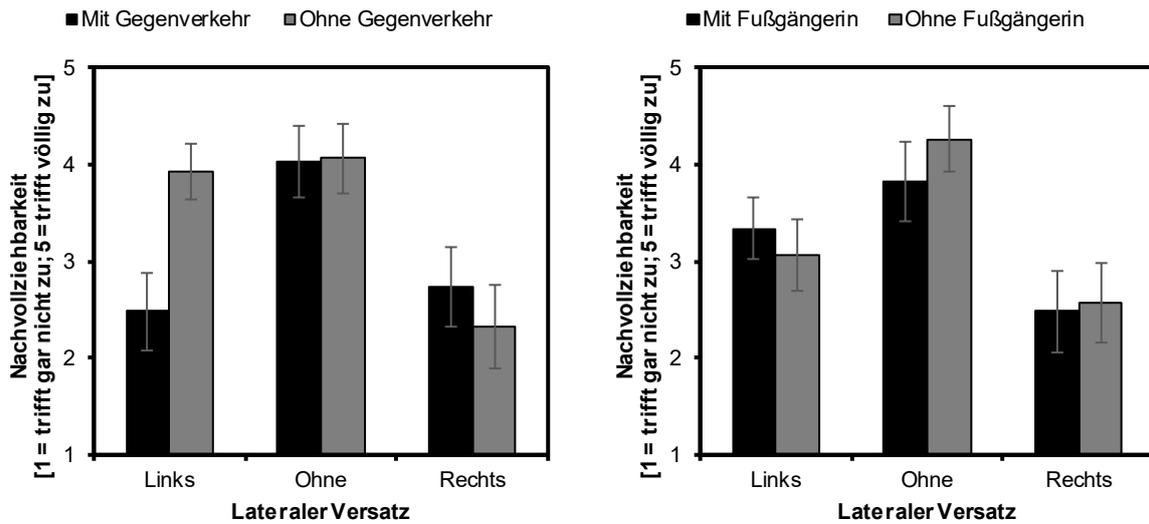


Abbildung 41: Links: Nachvollziehbarkeit des Fahrverhalten (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgrößen Gegenverkehr (G) und Lateraler Versatz (L). Rechts: Nachvollziehbarkeit des Fahrverhaltens (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgrößen Fußgängerpräsenz (F) und Lateraler Versatz (L).

Abbildung 42 zeigt die Hauptwirkung der Geschwindigkeit auf die Nachvollziehbarkeit des automatisierten Fahrverhaltens. Eine Geschwindigkeit von 30 km/h war aus Mitfahrersicht signifikant besser nachvollziehbar als eine Geschwindigkeit von 50 km/h ($M_{30 \text{ km/h}} = 3.42$, $M_{50 \text{ km/h}} = 3.10$). Hierbei ist jedoch zu beachten, dass der Unterschied zwischen den Mittelwerten der beiden Geschwindigkeiten sehr gering ist.

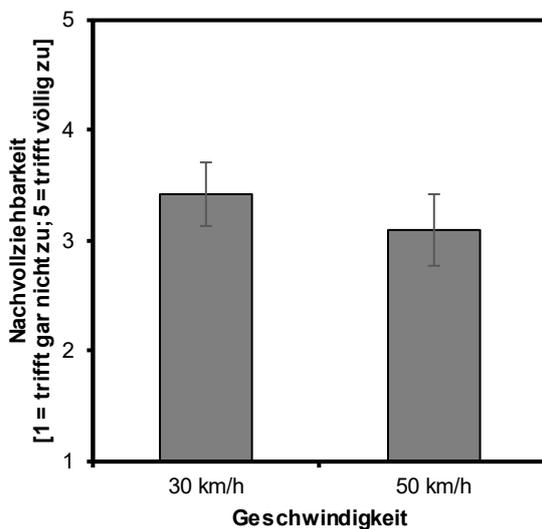


Abbildung 42: Nachvollziehbarkeit des Fahrverhaltens (Mittelwerte mit 95% Vertrauensintervall) in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (V).

Bei der Frage, inwieweit eine Verzögerung des automatisierten Fahrzeugs die Nachvollziehbarkeit des automatisierten Fahrverhaltens beeinflusst, ergab die zweifaktorielle Varianzanalyse weder eine signifikante Hauptwirkung ($F(1,31) = 2.78$, $p =$

.106), noch eine Wechselwirkung mit dem lateralen Versatz ($F(1,31) = 0.81, p = .449$). Jedoch hatte der laterale Versatz eine signifikante Hauptwirkung ($F(1,31) = 26.12, p < .001, \eta^2_{\text{par}} = .46$), die den oben dargestellten Ergebnissen entspricht. Hier führte vor allem der laterale Versatz nach rechts dazu, dass das Verhalten des automatisierten Fahrzeugs schlechter nachvollzogen werden konnte.

Insgesamt ist damit für die Nachvollziehbarkeit des automatisierten Fahrverhaltens aus Mitfahrersicht festzuhalten:

- Die Nachvollziehbarkeit des automatisierten Fahrverhaltens ist aus Mitfahrersicht am höchsten ausgeprägt, wenn das automatisierte Fahrzeug ohne lateralen Versatz im eigenen Fahrstreifen fährt, und gleichzeitig kein Gegenverkehr und keine Fußgängerin auf dem rechten Parkstand vorhanden ist.
- Ebenso gut nachvollziehbar ist ein lateraler Versatz nach links, jedoch nur, wenn gleichzeitig kein Gegenverkehr vorhanden ist.
- Ein lateraler Versatz nach rechts ist dagegen wenig nachvollziehbar, selbst ohne Gegenverkehr und Fußgängerpräsenz.
- Hinsichtlich der Geschwindigkeit zeigte sich, dass das Fahren der jeweils zulässigen Höchstgeschwindigkeit (30 km/h / 50 km/h) bei den einzelnen Fahrten im mittleren Bereich der Skala liegt.

Damit ergeben sich hier keine weiteren Hinweise für die besondere Auslegung der automatisierten Fahrfunktion bei Anwesenheit eines Fußgängers im Hinblick auf die Nachvollziehbarkeit. Vielmehr sind die Ergebnisse sehr vergleichbar zu denen der Risikobewertung und des Vertrauens in die Automation.

Die Ergebnisse zu den abhängigen Variablen Selbst fahren und Kontrollverlust sind vom Ergebnis her redundant zu den bereits dargestellten abhängigen Variablen, Vertrauen und Nachvollziehbarkeit. Aus diesem Grund wird auf eine Darstellung der Ergebnisse für diese beiden Items hier verzichtet.

5.1.2.4 Geschwindigkeitsbewertung

Hinsichtlich der Bewertung der gefahrenen Geschwindigkeit ergab die vier-faktorielle Varianzanalyse signifikante Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen Lateraler Versatz und Gegenverkehr sowie zwischen den Einflussgrößen Lateraler Versatz und Geschwindigkeit. Darüber hinaus hatten alle untersuchten Einflussgrößen signifikante Hauptwirkungen auf die Geschwindigkeitsbewertung. Die vollständigen Ergebnisse der Varianzanalyse sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf die Bewertung der Geschwindigkeit von Mitfahrern im hochautomatisierten Fahrzeug. Dargestellt sind die F- und p-Werte der Varianzanalyse, die zugehörigen Freiheitsgrade (df) und die Schätzung der Effektgröße.

	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>p</i>	η^2_{par}
Geschwindigkeit (V)	38.8	1,31	< .001	.56
Lateraler Versatz (L)	3.2	2,62	.048	.09
Gegenverkehr (G)	6.6	1,31	.015	.18
Fußgängerpräsenz (F)	18.5	1,31	< .001	.37
V x L	3.2	2,62	.049	.09
V x G	1.1	1,31	.300	
V x F	3.6	1,31	.066	
L x G	7.4	2,62	.001	.19
L x F	0.6	1,31	.569	
G x F	0.2	1,31	.653	
V x L x G	1.0	2,62	.908	
V x L x F	0.6	2,62	.578	
G x L x F	0.8	2,62	.473	
V x F x G	3.6	1,31	.068	
V x G x L x F	0.04	2,62	.713	

Abbildung 43 zeigt die Wechselwirkung des Gegenverkehrs und des lateralen Versatzes auf die Bewertung der gefahrenen Geschwindigkeit. Insgesamt liegen die mittleren Bewertungen im mittleren Bereich der Skala, zwischen dem Idealpunkt 4 (= genau richtig) und 5 (= schnell). Die beiden Bedingungen ohne lateralen Versatz bzw. mit lateralem Versatz nach rechts wurden mit und ohne Gegenverkehr nahezu identisch bewertet. Der Gegenverkehr macht jedoch einen Unterschied in der Bewertung aus, wenn das automatisierte Fahrzeug einen Versatz nach links fuhr. Hier bewerteten Mitfahrer die Geschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs mit Gegenverkehr um rund 0.2 Skalenpunkte als etwas zu schnell als ohne Gegenverkehr.

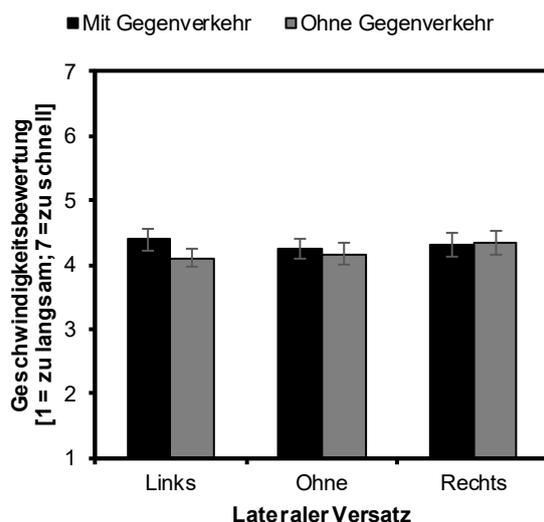


Abbildung 43: Bewertung der gefahrenen Geschwindigkeiten (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgrößen Gegenverkehr (G) und Lateraler Versatz (L).

Wie in Abbildung 44 dargestellt wird, erscheint die Wechselwirkung der Einflussgrößen Geschwindigkeit und Lateraler Versatz als deskriptiv sehr gering. Im Wesentlichen ist hier ein deutlicher Haupteffekt der gefahrenen Geschwindigkeit zu erkennen. Während 30 km/h als „genau richtig“ erschien, wurde die Geschwindigkeit 50 km/h als etwas zu schnell bewertet, wobei dies weitgehend unabhängig vom lateralen Versatz war. Bei Versatz nach rechts war dieser Effekt minimal stärker.

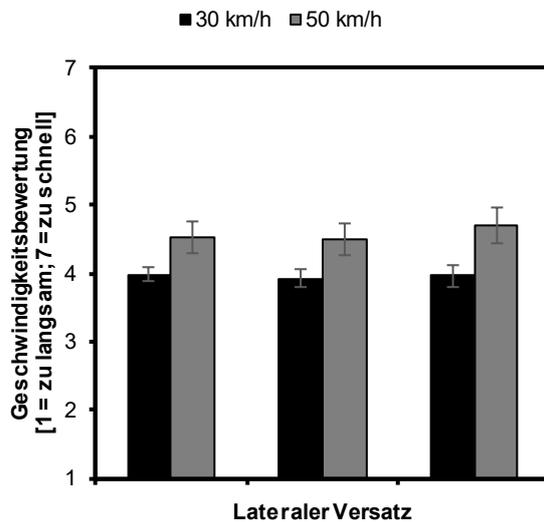


Abbildung 44: Bewertung der gefahrenen Geschwindigkeit (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgrößen Geschwindigkeit (V) und Lateraler Versatz (L).

Wie in Abbildung 45 dargestellt wird, hatte die Fußgängerpräsenz eine Hauptwirkung auf die Geschwindigkeitsbewertung der Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug. Bei Fußgängerpräsenz erscheint die Geschwindigkeit als etwas zu schnell, während sie ohne Fußgängerpräsenz als fast ideal erschien.

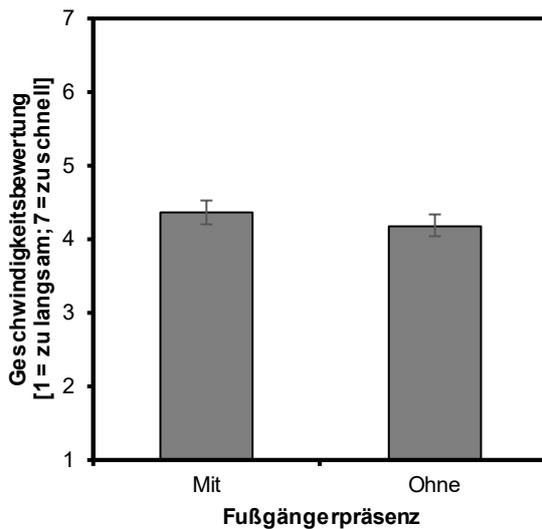


Abbildung 45: Bewertung der gefahrenen Geschwindigkeiten (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgröße Fußgängerpräsenz (F).

Bei der Frage, wie sich eine Verzögerung auf die Bewertung der Geschwindigkeit auswirkt, ergab die zwei-faktorielle Varianzanalyse weder signifikante Hauptwirkungen der Verzögerung ($F(1,31) = 0.01, p = .914$) und des lateralen Versatzes ($F(1,31) = 1.71, p = .189$) noch eine signifikante Wechselwirkung zwischen den beiden Einflussgrößen ($F(1,31) = 2.17, p = .123$).

Insgesamt ist damit für die Bewertung der Geschwindigkeit aus Mitfahrersicht festzuhalten:

- Insgesamt erschien in dem Szenario die Geschwindigkeit von 30 km/h als etwas angemessener als 50 km/h.
- Mit Fußgängerpräsenz erschien die gefahrene Geschwindigkeit etwas weniger angemessen als ohne Fußgänger.

5.1.2.5 Lateraler Abstand zu den Parkständen

Hinsichtlich der Bewertung des lateralen Abstands zu den Parkständen ergab die vier-faktorielle Varianzanalyse eine signifikante Wechselwirkung zwischen den Einflussgrößen Lateraler Versatz und Fußgängerpräsenz. Darüber hinaus hatten die Einflussgrößen Gegenverkehr und Lateraler Versatz signifikante Hauptwirkungen auf die Geschwindigkeitsbewertung. Die vollständigen Ergebnisse der Varianzanalyse sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zusammengefasst.

Tabelle 15: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf die Bewertung des lateralen Abstands zu den Parkständen von Mitfahrern im hochautomatisierten Fahrzeug. Dargestellt sind die F- und p-Werte der Varianzanalyse, die zugehörigen Freiheitsgrade (df) und die Schätzung der Effektgröße.

	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>p</i>	η^2_{par}
Geschwindigkeit (V)	.05	1,31	.826	
Lateraler Versatz (L)	123.9	1.2,36.6	< .001	.80
Gegenverkehr (G)	11.3	1,31	.002	.27
Fußgängerpräsenz (F)	1.1	1,31	.312	
V x L	2.1	1.8,54.3	.134	
V x G	.03	1,31	.858	
V x F	0.3	1,31	.595	
L x G	3.0	1.9,57.6	.061	
L x F	16.8	1.6,50.1	< .001	.35
G x F	0.7	1,31	.401	
V x L x G	1.5	1.6,50.2	.224	
V x L x F	0.2	2,62	.860	
G x L x F	1.1	1.5,44.4	.312	
V x F x G	0.3	1,31	.581	
V x G x L x F	0.9	1.6,48.6	.384	

Wie in Abbildung 46 dargestellt wird, bewerteten Mitfahrer den lateralen Abstand zu den Parkständen im Mittel mit 4 (= genau richtig) als nahezu ideal, wenn das automatisierte Fahrzeug ohne lateralen Versatz im eigenen Fahrstreifen fuhr. Hierbei war unerheblich, ob die Fußgängerin auf dem Parkstreifen rechts stand oder nicht. Ein lateraler Versatz nach links wurde im Mittel zwischen den Skalenpunkten 4 (= genau richtig) und 5 (= groß) bewertet, wobei der Abstand ohne Fußgängerpräsenz größer bewertet wurde als mit Fußgängerpräsenz. Ein lateraler Versatz nach rechts wurde im Mittel zwischen eher klein bis klein bewertet, wobei der Abstand bei Fußgängerpräsenz geringer bewertet wurde als ohne Fußgängerpräsenz.

Die Wechselwirkung mit der Fußgängerpräsenz erscheint relativ gering. Ein lateraler Versatz nach links erscheint bei Fußgängerpräsenz etwas angemessener als ohne Fußgänger, ein lateraler Versatz nach rechts dagegen mit Fußgänger noch weniger angemessen als ohne Fußgänger.

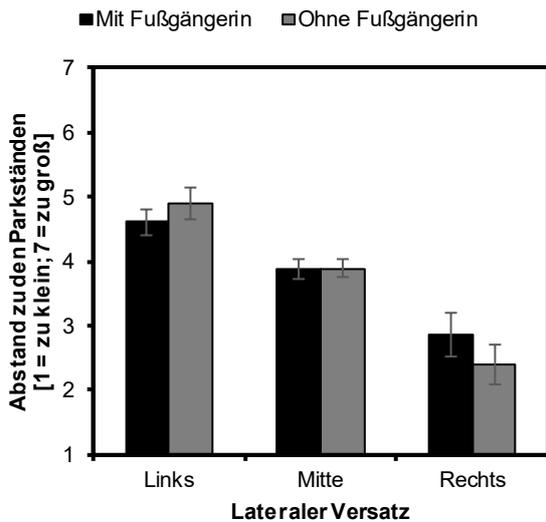


Abbildung 46: Bewertung des lateralen Abstands zu den Parkständen (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgrößen Fußgängerpräsenz (F) und Lateraler Versatz (L).

Wie in Abbildung 47 dargestellt, hat die Einflussgröße Gegenverkehr eine signifikante Hauptwirkung auf die Bewertung des lateralen Abstands zum parkenden Fahrzeug auf dem rechten Seitenstreifen. Der laterale Abstand des automatisierten Fahrzeugs zu dem parkenden Fahrzeug auf dem rechten Seitenstreifen wurde mit Gegenverkehr als etwas angemessener bewertet als ohne Gegenverkehr, wo der Abstand ein wenig kleiner als ideal bewertet wurde.

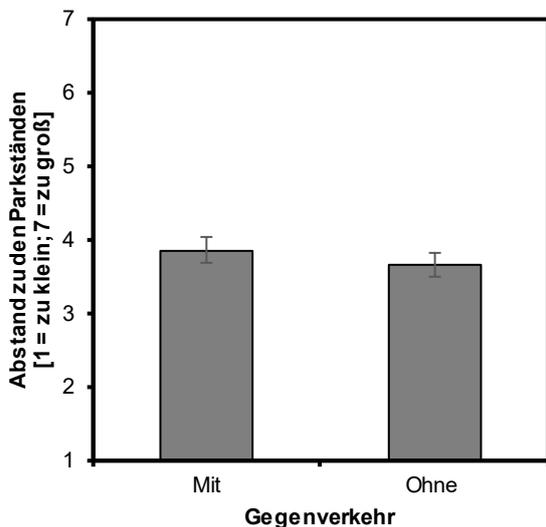


Abbildung 47: Bewertung des lateralen Abstands zu den Parkständen (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgröße Gegenverkehr (G).

Bei der Frage, inwieweit eine Verzögerung des automatisierten Fahrzeugs die Bewertung des lateralen Abstands zu den Parkständen beeinflusst, ergab die zweifaktorielle Varianzanalyse signifikante Hauptwirkungen der Verzögerung ($F(1,31) = 20.06, p < .001$,

$\eta^2_{\text{par}} = .39$) und des lateralen Versatzes ($F(1.6,50.4) = 6.8, p = .004, \eta^2_{\text{par}} = .18$) sowie eine signifikante Wechselwirkung der beiden Einflussgrößen ($F(1.4,45.9) = 96.4, p < .001, \eta^2_{\text{par}} = .76$). Wie Abbildung 48 zeigt, erscheint der laterale Abstand dann zu klein, wenn ein lateraler Versatz nach rechts vorliegt und nicht verzögert wird. Demgegenüber erscheint der laterale Versatz nach rechts eher angemessen, wenn das automatisierte Fahrzeug verzögert.

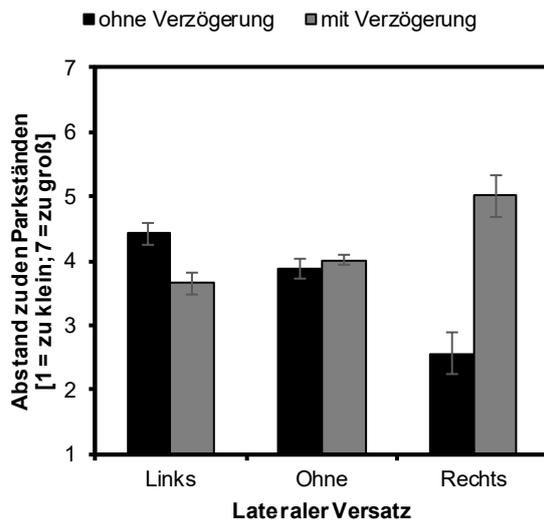


Abbildung 48: Bewertung des lateralen Abstands zu den Parkständen mit bzw. ohne Verzögerung (Mittelwerte mit 95% Vertrauensintervall) in Abhängigkeit des lateralen Versatzes im eigenen Fahrstreifen (L).

Insgesamt ist damit für die Bewertung des lateralen Abstands zu Parkständen festzuhalten:

- Aus Mitfahrersicht wird der Abstand zu den Parkständen ohne einen lateralen Versatz im eigenen Fahrstreifen nahezu ideal, und mit Versatz nach links sogar als groß auf der verwendeten Skala bewertet.
- Demgegenüber wird ein Versatz nach rechts als eher klein bewertet, wobei die Bewertungen mit und ohne Fußgängerpräsenz bei allen drei Ausprägungen des Versatzes ähnlich ausfallen.

5.1.2.6 Lateraler Abstand zur Fußgängerin

In der Hälfte der untersuchten Szenarien stand eine Fußgängerin auf dem rechten Parkstand. Für diese Szenarien wurde abgefragt, wie Probanden den lateralen Abstand zu dieser Fußgängerin bewerteten.

Hinsichtlich des lateralen Abstands zur Fußgängerin ergab die drei-faktorielle Varianzanalyse drei signifikante Hauptwirkungen der Einflussgrößen Lateraler Versatz, Geschwindigkeit, und Gegenverkehr auf die Bewertung des lateralen Abstands zur Fußgängerin. Die vollständigen Ergebnisse der drei-faktoriellen Varianzanalyse sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Tabelle 16 berichtet.

Tabelle 16: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf die Bewertung des lateralen Abstands zur Fußgängerin.

	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>p</i>	η^2_{par}
Geschwindigkeit (V)	8.1	1,31	.008	.21
Lateraler Versatz (L)	64.7	1.4,45.5	< .001	.68
Gegenverkehr (G)	15.7	1,31	< .001	.34
V x L	1.2	2,62	.302	
V x G	0.2	1,31	.631	
L x G	0.3	1.8,57.2	.731	
V x L x G	0.4	1.7,52.9	.661	

Wie in Abbildung 49 links dargestellt ist, wurde von Mitfahrern der laterale Abstand zur Fußgängerin bei einer Fahrtgeschwindigkeit von 50 km/h ($M = 3.28$) signifikant kleiner als bei 30 km/h ($M = 3.50$) bewertet. Ebenso bewerteten Mitfahrer den Abstand mit Gegenverkehr ($M = 3.52$) signifikant größer als ohne Gegenverkehr ($M = 3.26$, siehe Abbildung 49 rechts). Bei diesen Ergebnissen ist jedoch zu beachten, dass die Mittelwerte nahe dem Idealpunkt 4 (= genau richtig) liegen, und sich jeweils um weniger als 0.5 Skalenpunkte voneinander unterscheiden.

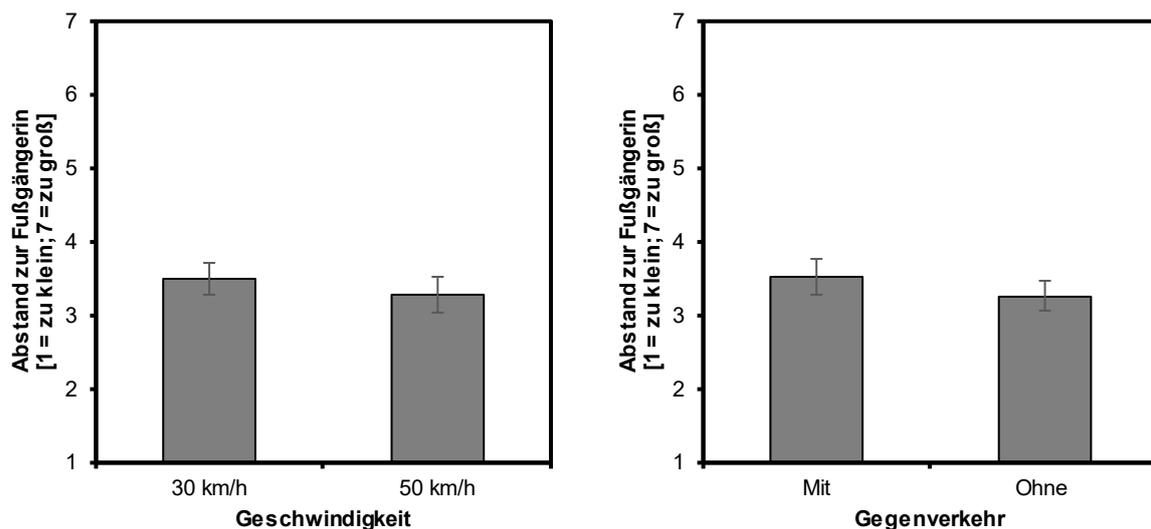


Abbildung 49: Links: Bewertung des lateralen Abstands zur Fußgängerin (Mittelwerte mit 95% Vertrauensintervall) in Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit (V). Rechts: Bewertung des lateralen Abstands zur Fußgängerin (Mittelwerte mit 95% Vertrauensintervall) in Abhängigkeit des Gegenverkehrs (G).

Wie in Abbildung 50 dargestellt ist, erscheint der Abstand zur Fußgängerin bei lateralem Versatz nach links als etwas zu groß, ohne lateralen Versatz als etwas zu klein und bei lateralem Versatz nach rechts als deutlich zu klein.

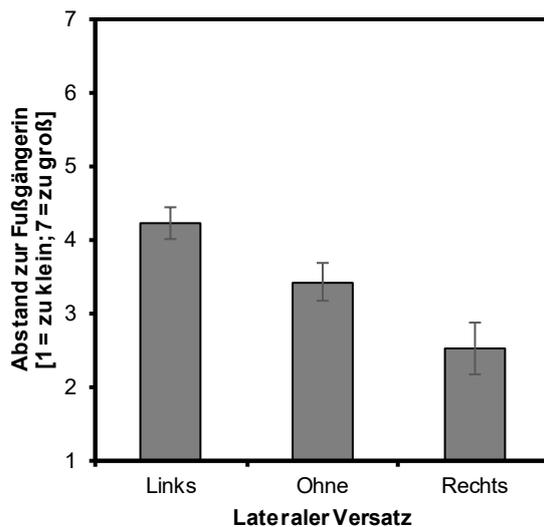


Abbildung 50: Bewertung des lateralen Abstands zur Fußgängerin (Mittelwerte mit 95% Vertrauensintervall) in Abhängigkeit vom lateralen Versatz im eigenen Fahrstreifen (L).

Bei der Frage, wie sich eine Verzögerung auf die Bewertung des lateralen Abstands zur Fußgängerin auswirkt, ergaben die beiden paarweisen Vergleiche (t-Tests für verbundene Stichproben) unterschiedliche Ergebnisse. Im ersten paarweisen Vergleich der Varianten des Fahr Szenarios, bei denen das hochautomatisierte Fahrzeug ohne lateralen Versatz in der Mitte des eigenen Fahrstreifens fuhr und gleichzeitig Gegenverkehr vorhanden war, bewerteten Mitfahrer im hochautomatisierten Fahrzeug den lateralen Abstand zur Fußgängerin als signifikant größer, wenn das hochautomatisierte Fahrzeug vor der Fußgängerin verzögerte ($t(1,32) = 3.56, p = .001$). Die mittlere Bewertung liegt in der Bedingung mit Verzögerung bei $M = 4.19$ nahe am Idealpunkt von 4, wohingegen die mittlere Abstandsbewertung ohne Verzögerung, mit $M = 3.52$ geringer ausfiel.

Im zweiten paarweisen Vergleich wurden die beiden Varianten des Fahr Szenarios (mit vs. ohne Verzögerung) miteinander verglichen, bei denen das hochautomatisierte Fahrzeug einen lateralen Versatz nach links im eigenen Fahrstreifen fuhr und gleichzeitig kein Gegenverkehr vorhanden war. Dabei zeigte sich, dass Mitfahrer den lateralen Abstand zur Fußgängerin ohne Verzögerung ($M = 4.11$) als signifikant größer bewerteten, als mit Verzögerung ($M = 3.79; t(1,32) = 2.13, p = .041$). Bei diesem Ergebnis ist allerdings zu beachten, dass der numerische Unterschied zwischen den beiden Bedingungen mit und ohne Verzögerung mit rund 0.3 Skalenpunkten zwar signifikant wird, aber gering ist und beide Mittelwerte nahe am Idealpunkt von 4 liegen.

Insgesamt ist damit für die Bewertung des lateralen Abstands zur Fußgängerin festzuhalten:

- Der Abstand zur Fußgängerin wirkt bei 50 km/h größer als bei 30 km/h. Allerdings ist der numerische Unterschied zwischen den beiden Mittelwerten sehr gering. Beide Mittelwerte liegen in einem akzeptablen Bereich.
- Bei Gegenverkehr wirkt der Abstand zu Fußgängerin akzeptabel, ohne Gegenverkehr erscheint er etwa zu klein.

- Bei lateralem Versatz nach links erscheint der Abstand zur Fußgängerin angemessen, ohne Versatz ein wenig zu klein und bei Versatz nach rechts deutlich zu klein.

5.1.2.7 Lateraler Abstand zum Gegenverkehr

In der Hälfte der untersuchten Szenarien war Gegenverkehr vorhanden. Für diese Szenarien wurde abgefragt, wie Probanden den lateralen Abstand zum Gegenverkehr bewerteten.

Hinsichtlich der Bewertung des lateralen Abstands zum Gegenverkehr ergab die dreifaktorielle Varianzanalyse eine signifikante Wechselwirkung zwischen der Geschwindigkeit und dem lateralen Versatz des Fahrzeugs im eigenen Fahrstreifen. Weiterhin hatten diese beiden Einflussgrößen jeweils signifikante Hauptwirkung. Die vollständigen Ergebnisse der drei-faktoriellen Varianzanalyse sind in Tabelle 17 Tabelle 16 berichtet.

Tabelle 17: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf die Bewertung des lateralen Abstands zum Gegenverkehr.

	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>p</i>	η^2_{par}
Geschwindigkeit (V)	7.2	1,31	.011	.19
Lateraler Versatz (L)	195.9	1.4,43.3	< .001	.86
Fußgängerpräsenz (F)	0.4	1,31	.540	
V x L	5.9	1.6,49.3	.009	.16
V x F	0.1	1,31	.781	
L x F	0.2	1.7,53.7	.821	
V x L x F	2.4	1.9,58.4	.100	

Wie Abbildung 51 zeigt, unterscheiden sich die Bewertungen in Abhängigkeit des lateralen Versatzes und der Geschwindigkeit. Dabei wird das Fahren ohne lateralen Versatz bei 30 km/h und bei 50 km/h als nahezu genau richtig ($M_{30 \text{ km/h}} = 3.85$, $M_{50 \text{ km/h}} = 3.85$) bewertet, während die mittlere Bewertung beim Versatz nach rechts bei beiden Geschwindigkeiten zwischen den Skalenpunkten 4 (= genau richtig) und 5 (= groß) liegt ($M_{30 \text{ km/h}} = 4.59$, $M_{50 \text{ km/h}} = 4.63$). Demgegenüber wird ein Versatz nach links als klein bewertet, wobei dieser Versatz bei 50 km/h ($M = 1.77$) als noch kleiner bewertet wird als bei 30 km/h ($M = 2.25$).

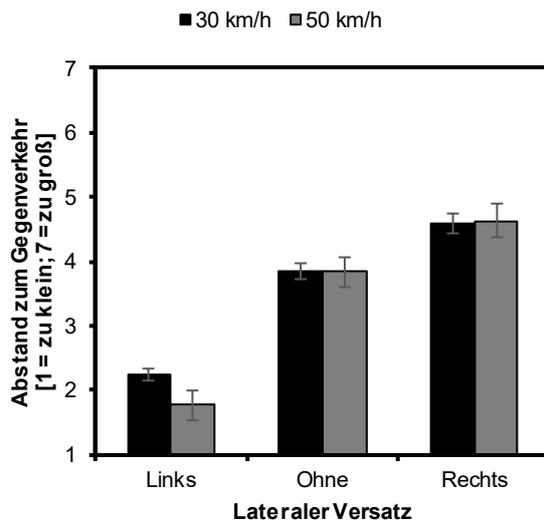


Abbildung 51: Bewertung des lateralen Abstands zum Gegenverkehr (Mittelwerte mit 95% Vertrauensintervall) in Abhängigkeit vom lateralen Versatz im eigenen Fahrstreifen (L) und der Geschwindigkeit (V).

Bei der Frage, wie sich eine Verzögerung auf die Bewertung des lateralen Abstands zur Gegenverkehr auswirkt, ergaben die beiden paarweisen Vergleiche (t-Tests für verbundene Stichproben) unterschiedliche Ergebnisse. Im ersten paarweisen Vergleich der Varianten des Fahr Szenarios, bei denen das hochautomatisierte Fahrzeug ohne lateralen Versatz in der Mitte des eigenen Fahrstreifens fuhr und gleichzeitig eine Fußgängerin auf dem rechten Parkstand stand, war die Bewertung des lateralen Abstands zum Gegenverkehr unabhängig von der Verzögerung ($t(1,32) = 1.64, p = .111$). Die mittleren Bewertungen lagen nahe des Idealpunkts von 4 ($M_{mit} = 3.89; M_{ohne} = 4.14$). Im zweiten paarweisen Vergleich wurden die Varianten mit und ohne Verzögerung verglichen, bei denen das hochautomatisierte Fahrzeug einen lateralen Versatz nach rechts im eigenen Fahrstreifen fuhr und gleichzeitig keine Fußgängerin auf dem Parkstand vorhanden war. Dabei zeigte sich, dass Mitfahrer im hochautomatisierten Fahrzeug den lateralen Abstand zum Gegenverkehr in der Bedingung ohne Verzögerung ($M = 4.61$) als signifikant größer bewerteten, als mit Verzögerung ($M = 3.55; t(1,32) = 2.13, p = .041$).

Insgesamt ist damit für die Bewertung des lateralen Abstands zu Gegenverkehr festzuhalten:

- Aus Mitfahrersicht ist das Fahren ohne lateralen Versatz im eigenen Fahrstreifen hinsichtlich des Abstands zum Gegenverkehr nahezu ideal. Diese Einschätzung ist unabhängig von der Geschwindigkeit. Ebenso im akzeptablen Bereich liegt ein lateraler Versatz nach rechts, der allerdings im Hinblick auf den lateralen Abstand zur Fußgängerin und zu den Parkständen problematisch ist.
- Demgegenüber führt ein lateraler Versatz nach links aus Mitfahrersicht zu einem geringen bzw. einem zu geringen lateralen Abstand zum Gegenverkehr, wobei diese Einschätzung bei höherer Geschwindigkeit noch geringer wirkt.

5.1.2.8 Abschlussbefragung

In der Abschlussbefragung am Ende des ersten Versuchsteils bewerteten die Probanden für drei ausgewählte Varianten des Fahr Szenarios, wie gefährlich bzw. wie wünschenswert ein lateraler Versatz im eigenen Fahrstreifen (Mitte / Links / Rechts) und das Abbremsen (Abbremsen / kein Abbremsen) in der jeweiligen Variante sind.

In der ersten Variante des Szenarios mit Fußgängerpräsenz auf dem rechten Parkstreifen, aber ohne Gegenverkehr bewertete knapp über die Hälfte der Mitfahrer (56 %) einen lateralen Versatz nach links als wünschenswertes Verhalten. Weitere 14 (44 %) Mitfahrer fanden das Fahren ohne Versatz wünschenswert. Demgegenüber bewerteten 29 (91%) Mitfahrer einen lateralen Versatz nach rechts in Richtung des Fußgängers als gefährliches Fahrverhalten. Insgesamt präferierten Mitfahrer somit einen lateralen Versatz nach links oder keinen Versatz in dieser Situation.

Weiterhin bewerten 20 (63 %) Mitfahrer das Abbremsen des automatisierten Fahrzeugs als wünschenswert, während eine Minderheit von 9 % dieses Verhalten als gefährlich einstuft. Eine knappe Mehrheit (53 %) hält es für gefährlich, wenn das automatisierte Fahrzeug in der abgefragten Situation nicht abbremst. 25 % der Mitfahrer hingegen möchten, dass das Fahrzeug in dieser Situation nicht abbremst. Insgesamt spricht sich die Mehrheit der Mitfahrer für ein Abbremsen des automatisierten Fahrzeugs in dieser Situation aus.

In der zweiten Variante des Fahr Szenarios mit Gegenverkehr, aber ohne Fußgänger bewerteten alle (100 %) Mitfahrer das Fahren ohne Versatz als wünschenswert. Demgegenüber bewerteten 31 (97 %) Mitfahrer einen lateralen Versatz nach links bzw. 22 (69 %) einen Versatz nach rechts als gefährliches Verhalten. Somit ergibt sich eine klare Präferenz für das Fahren in der Mitte des eigenen Fahrstreifens, ohne einen lateralen Versatz.

Bezüglich des Abbremsens war die Präferenz der Mitfahrer weniger eindeutig. Während 11 (34 %) Mitfahrer das Abbremsen des automatisierten Fahrzeugs als wünschenswert bewerteten, sprachen sich 8 (22 %) Mitfahrer dagegen aus. Ebenso wurde kein Abbremsen des Fahrzeugs von 13 (41 %) Mitfahrern als wünschenswert und gleichzeitig von 11 (34 %) Mitfahrern als gefährlich eingestuft.

Die dritte abgefragte Variante des Fahr Szenarios mit Gegenverkehr und Fußgängerpräsenz ergab eine klare Präferenz für das Fahren ohne Versatz (94 %). Demgegenüber wurde ein lateraler Versatz nach links bzw. nach rechts von einer breiten Mehrheit (91 % bzw. 94 %) der Mitfahrer als gefährlich bewertet. Darüber hinaus zeichnete sich eine klare Präferenz für das Abbremsen des automatisierten Fahrzeugs ab. 23 (72 %) Mitfahrer bewerteten dieses Verhalten als wünschenswert, während die gleiche Anzahl an Mitfahrern kein Abbremsen als gefährlich einstufte.

Insgesamt lassen sich folgende Ergebnisse der Abschlussbefragung festhalten:

- Mitfahrer bewerteten das Fahren ohne lateralen Versatz in allen drei Fahr Szenarien als wünschenswert. Demgegenüber ist ein lateraler Versatz nach links nur dann wünschenswert, wenn gleichzeitig kein Gegenverkehr vorhanden ist. Ein lateraler Versatz nach rechts wird eher abgelehnt, vor allem bei Fußgängerpräsenz auf dem rechten Parkstand.

- Hinsichtlich des Abbremsens sind die Ergebnisse insgesamt weniger eindeutig. Wenn sowohl links als auch rechts von eigenen Fahrstreifen Gegenverkehr und Fußgänger präsent sind, bewertet die Mehrheit der Mitfahrer ein Abbremsen des automatisierten Fahrzeugs als wünschenswert. Ähnlich verhält es sich bei Fußgängerpräsenz ohne gleichzeitigen Gegenverkehr. Ist allerdings nur Gegenverkehr vorhanden, sind die Mitfahrer geteilter Meinung.

5.1.2.9 Zusammenfassung Fragebogendaten: Anpassung der Fahrfunktion

Aus Sicht der Mitfahrenden ist nach diesen subjektiven Ergebnissen für eine Anpassung der Fahrfunktion des automatisierten Fahrzeugs bei Anwesenheit einer Fußgängerin zu empfehlen:

- Ohne Gegenverkehr erscheint ein lateraler Versatz nach links um etwa 0.5 m sinnvoll.
- Mit Gegenverkehr sollte ohne lateralen Versatz gefahren werden. Hier könnte eine Verzögerung um etwa 1 m/s^2 eingesetzt werden.

5.1.3 Ergebnisse: Fahrdaten

Im Folgenden werden die Ergebnisse des zweiten Versuchsteils, in dem die Probanden so fahren sollten, wie sie es sich in der jeweiligen Fahrsituation von einem automatisierten Fahrzeug wünschten, dargestellt. Die Ergebnisse werden jeweils getrennt für die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 30 km/h bzw. 50 km/h berichtet.

5.1.3.1 Geschwindigkeitsveränderung

Hinsichtlich der Geschwindigkeitsveränderung (vor vs. während der Fußgängerinteraktion) ergab die zwei-faktorielle Varianzanalyse (Faktor A: Messzeitpunkt, Faktor B: Gegenverkehr) eine signifikante Hauptwirkung der Einflussgröße Messzeitpunkt, jedoch nur bei 30 km/h. Die vollständigen Ergebnisse der Varianzanalyse sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zusammengefasst.

Tabelle 18: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der Einflussgrößen Messzeitpunkt, und Gegenverkehr auf die Geschwindigkeitsveränderung.

		<i>F</i>	<i>df</i>	<i>p</i>	η^2_{par}
Geschwindigkeitsveränderung	30 km/h	Messzeitpunkt	16.0	< .001	.34
		Gegenverkehr (G)	0.5	.500	
		M x G	0.8	.372	
	50 km/h	M	2.74	.108	
		G	0.10	.759	
		M x G	2.23	.146	

Abbildung 52 zeigt, dass die Geschwindigkeit der Fahrer auf Höhe der Fußgängerin in der 30 km/h Zone signifikant geringer war als zu Beginn des Fahrszenarios (70 m vor der Fußgängerin). Im Durchschnitt sank die Geschwindigkeit um $M = 2.8 \text{ km/h}$ von $M = 31.3$

km/h auf $M = 27.5$ km/h. Dieser Effekt zeigte sich in den beiden Bedingungen mit einem Tempolimit von 30 km/h. Bei 50 km/h fuhren die Fahrer mit konstanter Geschwindigkeit.

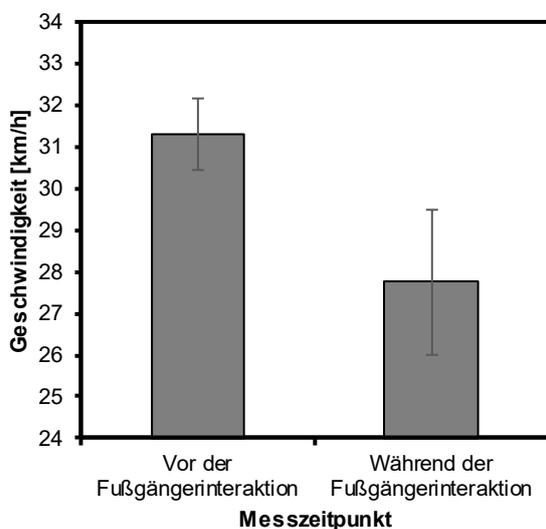


Abbildung 52: Geschwindigkeitsveränderung (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt (M).

5.1.3.2 Bremsen

Die berichteten Differenzen der Geschwindigkeiten lassen bereits darauf schließen, dass einige Fahrer im analysierten Streckenabschnitt bremsen. Wie in Tabelle 19 dargestellt, bremsen in der 30 km/h Zone fast die Hälfte der Probanden bei Gegenverkehr (44%) bzw. mehr als ein Drittel ohne Gegenverkehr (38%). Demgegenüber bediente in der 50 km/h Zone nur ein Fahrer das Bremspedal. Dieses Ergebnis deckt sich mit den zuvor berichteten Ergebnissen hinsichtlich der gefahrenen Geschwindigkeiten. Eine weiterführende Analyse der maximale Bremspedalstellung ergab, dass die Fahrer im Mittel leicht gebremst haben. Die maximal mögliche Bremspedalstellung liegt bei 9.

Tabelle 19: Anteil der Probanden, die im analysierten Streckenabschnitt (Beginn des Fahrzenarios bis zur Fußgängerin) bremsen (in %) und maximale Bremsstärke in Abhängigkeit des Gegenverkehrs (G) und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (V).

		Gegenverkehr	Anteil Bremsungen	Bremsstärke
Geschwindigkeit	30 km/h	ja	44	1.1
		nein	38	1.5
	50 km/h	ja	0	0
		nein	3	0.7

Veränderung der lateralen Position im eigenen Fahrstreifen

Hinsichtlich der Veränderung der lateralen Position des Fahrzeugs im eigenen Fahrstreifen (vor vs. während der Fußgängerinteraktion) ergab die zwei-faktorielle Varianzanalyse signifikante Wechselwirkungen zwischen den beiden Einflussgrößen Messzeitpunkt und Gegenverkehr. Weiterhin hatten beide Einflussgrößen jeweils eine

signifikante Hauptwirkung auf die abhängigen Variable. Alle Effekte traten sowohl in den Bedingungen mit einem Tempolimit von 30 km/h, als auch bei einem Tempolimit von 50 km/h auf. Die vollständigen Ergebnisse der Varianzanalyse sind in Tabelle 20 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** berichtet.

Tabelle 20: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der Einflussgrößen Messzeitpunkt, und Gegenverkehr auf die Geschwindigkeitsveränderung.

		<i>F</i>	<i>df</i>	<i>p</i>	η^2_{par}	
Veränderungen der lateralen Position im eigenen Fahrstreifen	30 km/h	Messzeitpunkt (M)	7.8	1,31	.009	.20
		Gegenverkehr (G)	38.0	1,31	< .001	.55
		M x G	4.8	1,31	.036	.13
	50 km/h	M	10.4	1,31	.003	.25
		G	23.2	1,31	< .001	.43
		M x G	9.5	1,31	.004	.24

Bei den Ergebnissen ist anzumerken, dass positive Abweichungen von 0 (= Fahrstreifenmitte) einem lateralen Versatz nach rechts entsprechen, und negative Werte entsprechend einen lateralen Versatz nach links bedeuten.

In der 30 km/h Zone (siehe Abbildung 53) fuhren die Fahrer mit Gegenverkehr vor der Interaktion mit der Fußgängerin einen leichten Versatz nach rechts ($M = + 0.17$ m), welcher auf der Höhe der Fußgängerin schwächer war ($M = + 0.09$ m).

In der Bedingung ohne Gegenverkehr zeigt sich ein ähnliches Ergebnismuster. Auch hier nahm der seitliche Versatz nach links als Reaktion auf die Fußgängerinteraktion zu. Zu Beginn der Fahrscenarien fuhren die Fahrer nahezu mittig im eigenen Fahrstreifen ($M = - 0.01$ m). Auf Höhe der Fußgängerin fuhren die Fahrer dann mit einem stärkeren lateralen Versatz nach links ($M = - 0.27$ m). Insgesamt veränderte sich der seitliche Versatz der Fahrer in der Bedingung ohne Gegenverkehr stärker als mit Gegenverkehr ($M_{mit} = -0.08$ m; $M_{ohne} = - 0.26$ m).

In der 50 km/h Zone (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** rechts) blieb die Position des Fahrzeugs während der Fußgängerinteraktion im Vergleich zu vor der Fußgängerinteraktion unverändert, wenn kein Gegenverkehr vorhanden war. Hier fuhren die Probanden zu beiden Messzeitpunkten nahezu perfekt mittig im eigenen Fahrstreifen. Wenn jedoch Gegenverkehr vorhanden war, fuhren die Fahrer bereits vor der Fußgängerinteraktion einen leichten seitlichen Versatz nach rechts ($M = + 0.08$ m), der auf Höhe der Fußgängerin stärker war ($M = + 0.23$ m). Somit änderte sich der laterale Versatz um 0.15 m.

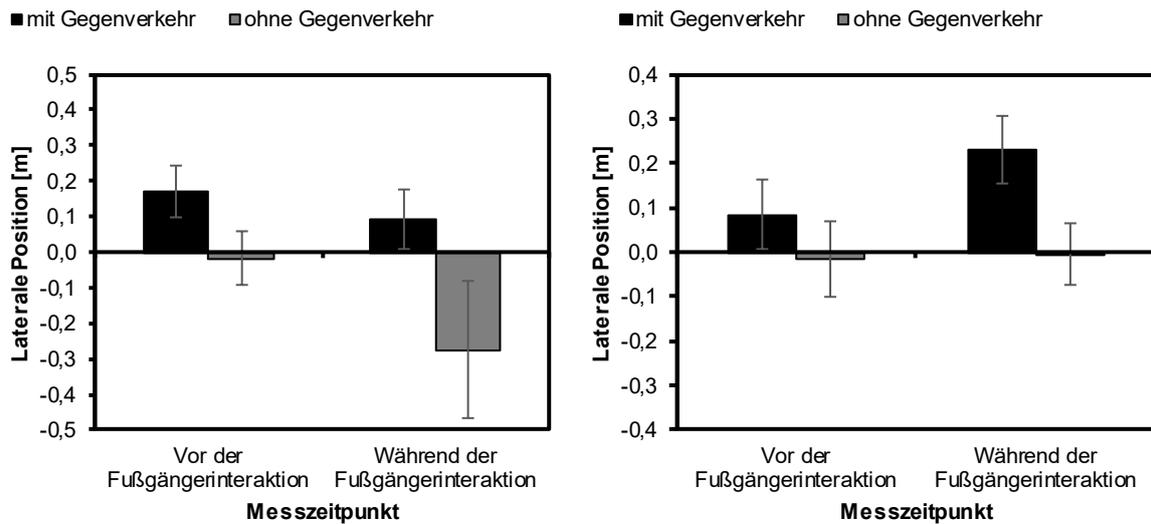


Abbildung 53: Links: Veränderung der lateralen Position (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Einflussgrößen Gegenverkehr (G) und Messzeitpunkt (M; vor vs. während der Fußgängerinteraktion).

5.1.3.3 Zusammenfassung Fahrdaten: Anpassung des Fahrverhaltens

Insgesamt ist damit vom eigenen Fahrverhalten für eine Anpassung des Fahrverhaltens bei Anwesenheit einer Fußgängerin festzuhalten:

- Ohne Gegenverkehr wurde beim Passieren der Fußgängerin knapp 0,2 m nach links gefahren.
- Eine solche Anpassung der Position wurde bei der geringeren Geschwindigkeit von 30 km/h gefunden.
- Eine Reduktion der Geschwindigkeit auf der Höhe der Fußgängerin fand sich vor allem bei der geringeren Geschwindigkeit von 30 km/h, wobei die Reduktion etwa 3,5 km/h betrug.

5.1.4 Diskussion

Die Fahrsimulatorstudie untersuchte das erlebte Risiko und den Fahrkomfort von Mitfahrern im automatisierten Fahrzeug in der Interaktion mit einem schwächeren Verkehrsteilnehmer in der Stadt. Dazu wurde eine innerstädtische gerade Hauptstraße mit seitlichen Parkständen als typische Interaktionssituation gewählt und im statischen Fahrsimulator umgesetzt.

Im ersten Versuchsteil wurde das erlebte Risiko aus Mitfahrersicht in Abhängigkeit der Fußgängerpräsenz auf dem Parkstand (mit, ohne), der Präsenz von Gegenverkehr (mit, ohne) und dem Fahrverhalten des automatisierten Fahrzeugs untersucht. Das automatisierte Fahrverhalten variierte im Hinblick auf die gefahrene Geschwindigkeit (30 km/h, 50 km/h) und die Spurmittenführung im eigenen Fahrstreifen (Versatz nach links, Versatz nach rechts, ohne Versatz) als Anpassung der Trajektorie. Zusätzlich verzögerte das automatisierte Fahrzeug in ausgewählten Varianten des Fahr Szenarios.

In einem zweiten Versuchsteil wurde untersucht, wie Mitfahrer in der Interaktion mit einem Fußgänger in dieser Fahrsituation *idealerweise* gefahren werden möchten. Dazu fuhren

die Probanden vier ausgewählten Varianten des Fahrszenarios selbst in einer für sie idealen Weise.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Fahrsimulatorstudie zusammenfassend nach der Fragestellung dargestellt.

Wie verändert sich das erlebte Risiko und der Fahrkomfort von Mitfahrern in der Interaktion mit einem Fußgänger in Abhängigkeit von verschiedenen Auslegungen der automatisierten Fahrfunktion in der untersuchten Fahrsituation?

Nach jeder erlebten Situation waren die Mitfahrer im ersten Versuchsteil befragt worden, wie sie den Fahrkomfort und das erlebte Risiko in der vorangegangenen Situation erlebten. Über alle Situationen hinweg wurde das erlebte Risiko als harmlos bis sehr unangenehm, aber im Mittel nicht als gefährlich bewertet. Ebenso wurde der Fahrkomfort im Mittel als durchschnittlich bis hoch bewertet, wobei die Bewertungen des erlebten Risikos und des Fahrkomforts bei niedriger Fahrgeschwindigkeit (30 km/h) positiver ausfallen als bei höherer Geschwindigkeit (50 km/h). Dennoch liegt das Fahren der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auch bei 50 km/h in einem akzeptablen Bereich im Hinblick auf das erlebte Risiko und den Fahrkomfort. Das hat einerseits einen positiven Effekt auf den Verkehrsfluss insgesamt, da dieser nicht durch automatisierte Fahrzeuge verlangsamt wird. Andererseits erfüllen automatisierte Fahrzeuge mit der Orientierung an der zulässigen Höchstgeschwindigkeit die sozialen Normen menschlicher Fahrer, welche sich von den gesetzlichen Verkehrsregeln unterscheiden können, z.B. im Hinblick auf die Tendenz vieler Fahrer zu schnell zu fahren (siehe Summala, 2007). Zumindest bei freier Fahrt würde ein Mischverkehr somit die menschlichen Fahrer nicht in ihrem allgemeinen Ziel, möglichst schnell anzukommen (siehe Crossen, 2000), beeinträchtigen.

Wenn das automatisierte Fahrzeug in der Mitte des eigenen Fahrstreifens fuhr, also ohne lateralen Versatz nach links oder rechts, waren die Bewertungen über alle Situationen hinweg sehr positiv. Hierbei wurden auch die Abstände zum Gegenverkehr, zur Fußgängerin, und zum Parkstand als nahezu ideal bewertet. Eine Anpassung der Trajektorie mittels eines lateralen Versatzes im eigenen Fahrstreifen ist jedoch in ausgewählten Konstellationen des untersuchten Fahrszenarios zu empfehlen.

Ein lateraler Versatz nach links wird von Mitfahrern als ebenso nachvollziehbar empfunden wie das Fahren ohne lateralen Versatz, wenn gleichzeitig kein Gegenverkehr vorhanden ist. Ebenso liegt das erlebte Risiko und das Vertrauen in die Automation auf einem vergleichbaren Niveau. Zudem gaben 56 % der Mitfahrer in der Abschlussbefragung an, dass ein lateraler Versatz nach links gewünscht wäre, wenn ein Fußgänger rechts auf dem Parkstand steht und gleichzeitig kein Gegenverkehr unterwegs ist. Auf diese Weise zeigt das automatisierte Fahrzeug seinem Mitfahrer, dass es den Fußgänger auf dem rechten Parkstand erkannt hat, und hält als Reaktion einen entsprechend großen Abstand zum schwächeren Verkehrsteilnehmer ein. Allerdings sollte diese Anpassung der Trajektorie der Situation angemessen sein. Ein Versatz nach links ist bei Gegenverkehr aufgrund der Kollisionsgefahr aus Mitfahrersicht riskant und senkt dessen Vertrauen in die Automation. Ein lateraler Versatz nach rechts wird von der Mehrheit der Mitfahrer abgelehnt, was sich in einem höheren erlebten Risiko und geringerem Fahrkomfort zeigt. In der Abschlussbefragung gaben auch ohne Fußgängerpräsenz rund 69 % der Mitfahrer an, dass sie einen Versatz nach rechts für gefährlich halten. Mit Fußgängerpräsenz sind es über 90 % der Mitfahrer, die dieses Verhalten ablehnen. Das liegt einerseits darin begründet, dass Mitfahrer die Kollision mit

dem schwächeren Verkehrsteilnehmer vermeiden möchten. Zum anderen befindet sich auf dem Parkstand rechts ein parkendes Fahrzeug. Auch hier möchte der Mitfahrer eine Kollision vermeiden. Des Weiteren könnte aus diesem parkenden Fahrzeug eine Person unvermittelt die Fahrertür zur Hauptstraße hin öffnen und aussteigen – ohne auf den fließenden Verkehr zu achten. Mit einem lateralen Versatz nach rechts würde das automatisierte Fahrzeug seinem Mitfahrer in dieser Situation womöglich signalisieren, dass es die potenzielle Gefahrensituation nicht erkennt und / oder nicht angemessen auf diese reagiert.

Aus Mitfahrersicht zeigte sich, dass eine Verzögerung das Vertrauen in die Automation erhöht. Durch die Anpassung der Geschwindigkeit sendet das automatisierte Fahrzeug ein Feedback an den Mitfahrer, dass das Fahrzeug ein potenzielles Risiko in der Fahrumgebung erkannt hat und seine Geschwindigkeit entsprechend verringert, um Zeit für eine angemessene Reaktion auf das potenzielle Risiko zu gewinnen. Dieses Verhalten wird aus Mitfahrersicht sehr positiv bewertet. Insgesamt bietet eine Verhaltensanpassung des automatisierten Fahrzeugs adaptiv an die spezifische Interaktionssituation die Möglichkeit, das Vertrauen des Mitfahrers in die Automation zu erhöhen, wenn dieses nicht bereits hoch ausgeprägt ist. So zeigt das automatisierte Fahrzeug seinem Mitfahrer, dass es die Situation als Ganzes verstanden hat und darauf mit sicherem Verhalten reagiert.

Während der laterale Versatz nach links bei Anwesenheit einer Fußgängerin ohne Gegenverkehr eine gute Möglichkeit bietet, dem Mitfahrer zu verdeutlichen, dass das automatisierte Fahrzeug sein Verhalten an die Anwesenheit anpasst, erscheint dies mit Gegenverkehr als wenig akzeptabel. Hier bietet eine Verzögerung eine gute Alternative, durch diese Verhaltensanpassung das Vertrauen in die Automation zu steigern.

Die Verhaltensanpassung über das Fahrzeugverhalten ist damit eine Alternative bzw. eine Ergänzung zu bestehenden Überlegungen zu Feedback über Anzeigen im Fahrzeug (siehe Bengler et al., 2020 für eine Übersicht). Im Gegensatz zu einer Anzeige, die dem Mitfahrer Informationen hinsichtlich erkannter Gefahren über ein Anzeigekonzept vermittelt, ist die Anpassung des Fahrverhaltens für den Mitfahrer direkt als fahrzeugseitige Reaktion auf eine Interaktionssituation verständlich. Gleichzeitig ist eine Verhaltensanpassung aus der Außensicht anderer Verkehrsteilnehmer sichtbar, sodass diese zur Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern genutzt werden könnte. Ein automatisiertes Fahrzeug könnte mittels seines Fahrverhaltens (z.B. einer Verzögerung) nach außen kommunizieren, dass es beispielsweise ein Gefahrenpotenzial in einer Interaktionssituation erkannt hat. Eine Eye-tracking Studie (Dey et al., 2019) zeigte, dass sich Fußgänger beim Überqueren einer Straße in größerer Distanz zunächst am Fahrverhalten eines Fahrzeugs und dessen Bewegungsmuster orientieren und erst in einer geringen Distanz zum Fahrzeug die Windschutzscheibe fixieren, um möglicherweise Augenkontakt mit dem Fahrer zu suchen. Somit könnte fahrzeugseitige Kommunikation über Bewegung bestehende Überlegungen hinsichtlich einer externen Anzeige (siehe Bengler et al., 2020 und Schieben et al., 2019 für eine Übersicht) ergänzen bzw. bei größerer Distanz möglicherweise sogar ersetzen, wenn das Fahrzeug eine frühzeitige Verhaltensreaktion auf den Fußgänger zeigt. Das bestätigen auch die Ergebnisse einer Beobachtungsstudie von Lee et al. (2020).

Wie möchten Mitfahrer in der Interaktion mit einem Fußgänger in dieser Fahrsituation idealerweise gefahren werden?

Ziel des zweiten Versuchsteils war es, zu untersuchen, wie Mitfahrer in der Interaktion mit einem Fußgänger in dieser Fahrsituation idealerweise gefahren werden möchten.

Dazu sollten Probanden in vier ausgewählten Varianten des Fahrszenarios selbst, also manuell, so fahren, wie sich es sich idealerweise von einem automatisierten Fahrzeug in der jeweiligen Situation wünschen würden. Im Hinblick auf das Fahrverhalten wurden die Aspekte Geschwindigkeit, Bremsverhalten und die laterale Position des Fahrzeugs im eigenen Fahrstreifen analysiert.

Mit diesem Vorgehen wurde einerseits geprüft, ob im ersten Versuchsteil die relevanten Einflussgrößen abgedeckt wurden. Andererseits ermöglicht dieses Vorgehen, zu untersuchen, ob es noch weitere Einflussgrößen gibt, die sich auf das erlebte Risiko und auf den Fahrkomfort von Mitfahrern im automatisierten Fahrzeug auswirken.

Hinsichtlich der Geschwindigkeit zeigen die Ergebnisse deutlich, dass sich automatisierte Fahrzeuge an der jeweils zulässigen Höchstgeschwindigkeit orientieren sollten. Somit wurde mit der Umsetzung der Geschwindigkeit im ersten Versuchsteil bereits der Präferenz menschlicher Fahrer, die zulässige Höchstgeschwindigkeit zu fahren, durch die automatisierte Fahrfunktion entsprochen.

Auch bei dieser Methodik zeigte sich, dass ohne Gegenverkehr ein leichtes Ausweichen nach links gewünscht wird, wobei deutlich weniger (knapp 0.2 m) nach links gefahren wurde, als es im ersten Versuchsteil realisiert worden war. Weiter wurde dies vor allem bei der langsameren Geschwindigkeit von 30 km/h gefunden. Eine Reduktion der Geschwindigkeit wurde ebenfalls gewünscht, allerdings auch hier vor allem bei 30 km/h.

5.1.5 Zusammenfassung Studie 1: Anpassung der Fahrfunktion bei Anwesenheit einer Fußgängerin

Insgesamt stimmen damit die Ergebnisse der beiden methodischen Ansätze in Studienteil 1 (Gefahren werden) und Studienteil 2 (Selbst fahren) sehr gut überein. Sowohl die subjektive Bewertung eines vorgegebenen Verhaltens eines automatisierten Fahrzeugs als auch das selbst gefahrene ideale Verhalten zeigte insgesamt, dass eine Verhaltensanpassung eines automatisierten Fahrzeugs bei Anwesenheit einer Fußgängerin gewünscht wird und sinnvoll erscheint und das erlebte Risiko verringert. Unter Berücksichtigung des Gegenverkehrs erscheint folgende Anpassung sinnvoll:

- Ohne Gegenverkehr sollte bei Anwesenheit eines Fußgängers ein leichter Versatz nach links gefahren werden (0.2 – 0.5 m).
- Bei niedriger Geschwindigkeit (30 km/h) scheint eine leichte Verzögerung sinnvoll (1.0 m/s^2 , um circa 3-4 km/h).

Durch beide Anpassungen erlebt der Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug, dass dieses auf die potenzielle Gefahr durch einen Fußgänger reagiert, sodass damit das Vertrauen in die Automation erhöht wird, gleichzeitig das erlebte Risiko verringert wird.

5.1.6 Methodische Bewertung

Im Rahmen der vorliegenden Studie ist es gelungen, eine heterogene Stichprobe hinsichtlich des Alters der Fahrer und der Fahrleistung zu rekrutieren. Bei der Analyse wurden keine Hinweise darauf gefunden, dass Stichprobenmerkmale (Alter, Geschlecht, Fahrleistung, Kenntnisstand Automation) einen Einfluss auf das erlebte Risiko und den Fahrkomfort aus Mitfahrersicht im untersuchten Fahrscenario hatten.

Bei den Ergebnissen der vorliegenden Studie ist zu beachten, dass die Probanden im Vorfeld der Studie über keine persönlichen Erfahrungen als Mitfahrer in hochautomatisierten Fahrzeugen verfügten. Folglich hatten die Probanden bislang keine Präferenzen hinsichtlich der Fahrweise dieser Fahrzeuge ausgebildet. Entsprechend war die Aufgabe im zweiten Versuchsteil, so zu fahren, wie man es sich von einem automatisierten Fahrzeug in der Situation wünschen würde, für die Probanden möglicherweise sehr anspruchsvoll. Zwar erlebten die Probanden im ersten Versuchsteil eine Reihe unterschiedlicher Auslegungen einer automatisierten Fahrfunktion und absolvierten eine Trainingsfahrt in Vorbereitung auf den zweiten Versuchsteil. Dennoch waren diese Maßnahmen womöglich kein Ersatz für die fehlende eigene Erfahrung. Zudem sind die Probanden nicht daran gewöhnt, spezifische Fahrmanöver im Fahrsimulator präzise auszuführen. Die Ergebnisse des zweiten Versuchsteils sind entsprechend als Annäherung an ein ideales automatisiertes Fahrverhalten zu verstehen. Um darüber hinaus sicherzustellen, dass das gezeigte Fahrverhalten der Fahrer im zweiten Versuchsteil tatsächlich dem gewünschten automatisierten Fahrverhalten aus Mitfahrersicht entspricht, hätten Fahrer ihre Fahrten nochmal als Mitfahrer erleben können. Dieser Schritt war jedoch angesichts der langen Studiendauer (120 Minuten) im Rahmen dieser Studie nicht möglich.

Durch die Zusammenarbeit mit Funktionsentwicklern des Instituts für Regelungstechnik basiert die Umsetzung der automatisierten Fahrfunktion auf fundierten Annahmen über die aus technischer Sicht möglichen Auslegungen. Auf diese Weise war es möglich, hochautomatisiertes Fahren (SAE Level 4; SAE, 2014,2018) für menschliche Mitfahrer im Fahrsimulator erlebbar zu machen. Im Rahmen der vorliegenden Studie war es jedoch nicht möglich, alle möglichen Auslegungen der automatisierten Fahrfunktion unter Berücksichtigung aller Fahrparameter umzusetzen. Das war aber auch nicht das Ziel der vorliegenden Studie. Stattdessen wurden ausgewählte Ausprägungen zweier relevanter Parameter in einem realistischen Fahrscenario umgesetzt.

Hinsichtlich der Übertragbarkeit auf den realen Straßenverkehr ist bei der vorliegenden Studie zu beachten, dass die vorliegende Studie eine dyadische Interaktion mit *einem* schwächeren Verkehrsteilnehmer in *einer* typischen Situation im Stadtverkehr untersuchte. Diese Vereinfachung ermöglicht eine gezielte Untersuchung der einzelnen Einflussgrößen in einer typischen Fahrsituation in der Stadt. Gleichzeitig reduziert diese Darstellung die Komplexität des Alltags im urbanen Straßenverkehr, wo mitunter eine Vielzahl menschlicher Verkehrsteilnehmer miteinander interagieren (Radfahrer, Fußgänger, Autofahrer). Entsprechend ist zu untersuchen, wie Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug in komplexeren Verkehrssituationen mit (mehreren) schwächeren Verkehrsteilnehmern automatisiert gefahren werden möchten. Es bieten sich daher vielfältige Möglichkeiten zur Erweiterung des untersuchten Fahrscenarios an:

- Statische Hindernisse, welches sich im Fahrstreifen des automatisierten Fahrzeugs befinden, z.B. ein Lieferwagen mit einer aussteigenden Person.

- Bewegliche Hindernisse im Fahrstreifen des automatisierten Fahrzeugs, z.B. ein Lieferwagen mit einer aussteigenden Person oder spielende Kinder bzw. Ball (bewegliche Hindernisse).
- Andere Straßentypen: Spielstraßen, Wohngebiete, Ringstraße mit zwei Fahrstreifen in jede Fahrtrichtung
- Infrastruktur: Verdeckte, schlecht einsehbare Straßen, vor allem in dicht bebauten Wohngebieten.
- Umweltfaktoren: Tageszeiten mit unterschiedlichen Lichtverhältnissen
- Personenbezogene Faktoren: Müdigkeit, Zeitdruck

Weiterhin ist die Komplexität des Fahr Szenarios durch eine Kombination der genannten Einflussgrößen prinzipiell beliebig zu steigern. Die Untersuchung solcher komplexen Interaktionssituationen setzt jedoch einen weit fortgeschrittenen Entwicklungsstand der automatisierten Fahrfunktion voraus, sodass für die Untersuchung im Fahr Simulator fundierte, realistische Annahmen über die automatisierte Fahrfunktion getroffen werden können.

Der Fahr Simulator bietet die Möglichkeit auch Grenzzustände und Grenzszenarien bzw. aus objektiver Sicht risikoreiche Auslegungen der automatisierten Fahrfunktion zu untersuchen, welche im Realverkehr so nicht untersuchbar wären. Gleichzeitig ist es aber so, dass den Probanden zu jedem Zeitpunkt bewusst ist, dass sie sich in einer experimentellen Situation befinden, von der keine Gefahr ausgeht. Das führt trotz einer hohen Realismus der Fahr Situation im Fahr Simulator möglicherweise zu einer Unterschätzung des erlebten Risikos bzw. zu einer Überschätzung des Fahrkomforts. Es ist möglich, dass Probanden dieselben technischen Auslegungen in der Realfahrt anders bewerten würden.

Im untersuchten Fahr Szenario stand die Fußgängerin nicht unmittelbar im Fahrstreifen des automatisierten Fahrzeugs, sodass aus Mitfahrersicht im automatisierten Fahrzeug keine unmittelbare Kollision mit der Fußgängerin zu erwarten war. Somit hat der Aufbau der Interaktionssituation zwischen dem Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug und der Fußgängerin möglicherweise dazu beigetragen, dass sich die subjektive Risikobewertung schwerpunktmäßig in der unteren Hälfte der Skala zwischen den Skalenpunkten 1 (= harmlos) und 4 (= sehr unangenehm) liegt. Um die Kritikalität dieser Interaktionssituation zu erhöhen, wäre als Erweiterung denkbar, dass die Fußgängerin auf die Straße tritt, um diese vor dem automatisierten Fahrzeug zu überqueren oder sie die Fahrtür öffnet, um in das auf dem rechten Seitenstreifen geparkte Auto einzusteigen. Hier würde sich ein unmittelbarer Kollisionskurs des automatisierten Fahrzeugs mit dem schwächeren Verkehrsteilnehmer ergeben. In diesem Fall wären als Reaktion ein Abbremsen oder Ausweichen des automatisierten Fahrzeugs in Richtung Gegenverkehr aus Mitfahrersicht zu untersuchen.

Weiterhin wurde die Studie in einem statischen Fahr Simulator durchgeführt, sodass die Probanden kein haptisches Feedback im Sinne einer physischen Rückkopplung hinsichtlich der longitudinalen und lateralen Beschleunigung erhielten. Physische Aspekte sind jedoch auf Mitfahrersicht entscheidend für das Erleben von Fahrkomfort beim automatisierten Fahren (Elbanhawi et al., 2015). Das schränkt die Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Fahr Simulator Studie auf die Realfahrt bzw. auf das Erlebnis im Realfahrzeug ein.

Aufgrund der fehlenden physischen Rückkopplung im statischen Fahr Simulator und der eingeschränkten Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich des erlebten

Risikos und des Fahrkomforts von Mitfahrern auf die Realfahrt ist es notwendig, die Ergebnisse im Realfahrzug zu validieren. Zur Validierung wurde eine Probandenstudie im Vehicle-in-the-Loop Fahrzeug auf einem Testgelände durchgeführt (siehe Kapitel 5.3; siehe auch Bock et al., 2007). In dieser Studie wurde eine Auswahl an Auslegungen der automatisierten Fahrfunktion in einem nahezu identischen Fahrscenario unter Verwendung derselben Messinstrumente durchgeführt, um eine methodische Durchgängigkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse herzustellen.

5.2 Studie 2: Erlebtes Risiko an einer Einmündung (TUBS)

Diese Studie liefert Hinweise darauf, wie eine automatisierte Fahrfunktion an einer Einmündung aus Sicht von Mitfahrern und schwächerer Verkehrsteilnehmer ausgelegt werden soll, damit sich alle menschlichen Verkehrsteilnehmer in dieser Interaktionssituation sicher fühlen.

Die im Rahmen der zweiten Studie zu beantwortenden Forschungsfragen lauteten:

- Welchen Bremsbeginn präferieren Mitfahrer im hochautomatisierten Fahrzeug, wenn das Fahrzeug, in dem sie sich befinden, auf eine Einmündung zufährt und einem schwächeren Verkehrsteilnehmer Vorfahrt gewähren muss? Welchen Bremsbeginn finden Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug im Hinblick auf ihr erlebtes Risiko gerade noch akzeptabel?
- Welchen Bremsbeginn präferieren demgegenüber schwächere Verkehrsteilnehmer an der Einmündung, der sich ein hochautomatisiertes Fahrzeug mit verschiedenen Geschwindigkeiten nähert? Welchen Bremsbeginn finden schwächere Verkehrsteilnehmer im Hinblick auf ihr erlebtes Risiko gerade noch akzeptabel?

5.2.1 Methodik

Das methodische Vorgehen war gegenüber der Pilotstudie hinsichtlich des Versuchsplans, der abhängigen Variablen sowie der Durchführung unverändert. Die Instruktionen der Probanden wurden auf Basis der Pilotstudie präzisiert und um die Information ergänzt, dass die Probanden die Videos zur Konfiguration der Bremsungen sowie zur Prüfung der konfigurierten Bremsungen mehrfach abspielen können.

5.2.2 Stichprobe

An der Onlinestudie nahmen $N = 225$ Probanden teil, wobei die soziodemographischen Daten von $n = 5$ Probanden fehlten, sodass sich die Beschreibung der Stichprobe auf $n = 220$ Probanden (124 männlich, 95 weiblich, 1 divers) im Alter von 18 bis 75 Jahren ($M = 36.2$ Jahre; $SD = 15.5$ Jahre) bezieht. Im Durchschnitt besaßen die Probanden ihren Führerschein seit 18.0 Jahren ($SD = 15.2$ Jahre) und 60.8 % fuhren mindestens mehrmals in der Woche selbst Auto. Die Technikaffinität lag bei $M = 4.05$ ($SD = 1.05$) auf einer 6-stufigen Skala (ATI Skala; Franke et al., 2019). 76 % der Probanden gaben an, Erfahrungen mit Fahrerassistenzsystemen zu haben, davon 31 % mit einem Notbremsassistenten. Etwas über die Hälfte der Probanden (51 %) hat bereits Erfahrung mit dem Fahren im Fahrsimulator.

Die Studie wurde aufgrund der Coronapandemie als Videostudie im Zeitraum von Juni bis August 2020 online durchgeführt. Die Probanden wurden über Social-Media

Plattformen, studentische E-Mail Verteiler, durch persönliche Ansprache sowie über eine Pressemitteilung durch die TU Braunschweig rekrutiert. Auf diese Weise sollte ein möglichst breites Spektrum der Fahrbevölkerung in Deutschland angesprochen werden. Eine Voraussetzung für die Teilnahme an der Studie war ein gültiger Führerschein. Weiterhin war aus technischen Gründen eine Teilnahme ausschließlich am Laptop/PC mit einer stabilen Internetverbindung möglich, damit die Videos fehlerfrei abgespielt werden. Eine Teilnahme am Smartphone war aus diesem Grund ausgeschlossen.

Als Aufwandsentschädigung für die Teilnahme an der Onlinestudie hatten Teilnehmer die Möglichkeit am Ende der Studie an einer Verlosung von insgesamt 25 Amazon Gutscheinen im Wert von jeweils 10 Euro teilzunehmen. Psychologiestudierende im Bachelorstudiengang Psychologie der TU Braunschweig konnten zwischen der Teilnahme an der Verlosung und 0.5 Versuchspersonenstunden wählen.

5.2.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Onlinestudie berichtet. Insgesamt wurden Daten von $N = 225$ Probanden aufgezeichnet. Da die soziodemographischen Daten von $n = 5$ Probanden fehlten, wurden die Daten von $n = 220$ Probanden analysiert. Das entspricht einem Gesamtanteil von 98 % der Gesamtstichprobe.

Damit die Onlinestudie pro Proband eine maximale Bearbeitungsdauer von 20 bis 30 Minuten haben sollte, erlebte jeder Proband nur zwei von insgesamt 16 Varianten des Fahrzenarios. Entsprechend wurde für jede abhängige Variable (siehe Abschnitt 7.2.2.1.3) ein linear gemischtes Modell gerechnet. In diesem Modell wurden die Perspektive (Innensicht des Mitfahrers / Außensicht des Fußgängers, des Radfahrers), der Verkehrsteilnehmer (Fußgänger / Radfahrer) sowie die Richtung aus dem der Verkehrsteilnehmer sich aus Mitfahrersicht der Einmündung nähert (Links / Rechts) modelliert. Für die beiden Anfahrtgeschwindigkeiten des automatisierten Fahrzeugs (30 km/h / 50 km/h) wurden jeweils separate Modelle gerechnet, da sich einfach aufgrund der unterschiedlichen Anfahrtgeschwindigkeiten signifikante Hauptwirkungen der Geschwindigkeit ergeben würden, die aber trivial sind.

5.2.3.1 Distanz zur Haltelinie zum idealen und zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt

Bei der Frage, wann ein automatisiertes Fahrzeug beim Heranfahren an eine Einmündung idealerweise mit dem Bremsvorgang beginnen soll, ergaben die linear gemischten Modelle (Faktor A: Perspektive, Faktor B: Verkehrsteilnehmer, Faktor C: Richtung) weder signifikante Hauptwirkungen noch Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen für beide Anfahrtgeschwindigkeiten des automatisierten Fahrzeugs (30 km/h, 50 km/h).

Hinsichtlich der Frage, wann ein automatisiertes Fahrzeug beim Heranfahren an eine Einmündung spätestens mit dem Bremsvorgang beginnen sollte, zeigte sich eine signifikante Wechselwirkung zwischen den Einflussgrößen Verkehrsteilnehmer und Richtung auf die Distanz zu Haltelinie bei einer Anfahrtgeschwindigkeit von 50 km/h. Die Modelle zeigten keine weiteren Haupt- oder Wechselwirkungen.

Die vollständigen Ergebnisse der linear gemischten Modelle für die Distanzen zur Haltelinie zum idealen und zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt sind in Tabelle 21 zusammengefasst.

Tabelle 21: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf die Distanz zur Haltelinie zum idealen und letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt.

		<i>F</i>	<i>df</i>	<i>p</i>	
30 km/h	Distanz zur Haltelinie zum idealen Bremszeitpunkt	Perspektive (P)	0.03	1,100.8	.873
		Verkehrsteilnehmer (V)	0.08	1,100.8	.784
		Richtung (R)	2.67	1,72.7	.107
		P x V	0.01	1,100.8	.928
		P x R	0.78	1,72.7	.379
		V x R	0.04	1,72.7	.840
		P x V x R	0.43	1,72.7	.515
	Distanz zur Haltelinie zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt	P	2.52	1,99.3	.116
		V	0.20	1,99.3	.656
		R	0.03	1,99.3	.859
		P x V	0.39	1,99.0	.535
		P x R	0.00	1,93.0	.996
		V x R	0.37	1,93.0	.544
		P x V x R	2.75	1,93.0	.100
50 km/h	Distanz zur Haltelinie zum idealen Bremszeitpunkt	P	0.64	1,92.1	.425
		V	1.53	1,92.1	.219
		R	0.02	1,92.1	.895
		P x V	0.05	1,101.3	.825
		P x R	0.99	1,92.1	.322
		V x R	1.06	1,101.3	.307
		P x V x R	0.15	1,101.3	.701
	Distanz zur Haltelinie zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt	P	1.01	1,71.9	.317
		V	0.16	1,71.9	.687
		R	0.06	1,109.2	.804
		P x V	0.00	1,71.9	.984
		P x R	0.12	1,109.2	.736
		V x R	4.87	1,109.2	.029
		P x V x R	0.20	1,109.2	.660

Abbildung 54 zeigt die mittleren Distanzen zur Haltelinie zum idealen Bremszeitpunkt (links) bzw. zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt (rechts) für alle Versuchsbedingungen bei einer Anfahrtgeschwindigkeit von 30 km/h.

Zum idealen Bremszeitpunkt (siehe Abbildung 54 links) liegt die Distanz des automatisierten Fahrzeugs zur Haltelinie bei Bremsbeginn im Mittel zwischen 30.2 m und 31.2 m ($M = 30.9$ m) aus Mitfahrsicht und zwischen 29.5 m und 32.1 m ($M = 30.5$ m) aus Radfahrer- und Fußgängersicht, wobei die breite Streuung der Mittelwerte (95 % Vertrauensintervall) aus beiden Perspektiven ähnlich groß ist um im Bereich von 24 m bis 38 m liegt. Da bedeutet, dass die Präferenz dafür, wann ein automatisiertes Fahrzeug idealerweise mit dem Bremsvorgang beginnen soll, individuell sehr unterschiedlich ist.

Aus Mitfahrsicht im automatisierten Fahrzeug sind die mittleren Distanzen zur Haltelinie über alle Versuchsbedingungen hinweg nahezu identisch. Das bedeutet, dass Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug unabhängig davon, ob sie mit einem Radfahrer oder Fußgänger, welcher sich der Einmündung von links oder rechts nähert, zu einem ähnlichen Zeitpunkt bremsen möchten. Aus der Außensicht schwächerer Verkehrsteilnehmer gibt es geringfügige Mittelwertsunterschiede aufgrund der Richtung,

aus sich Fußgänger und Radfahrer der Einmündung nähern. Allerdings sind diese statistisch nicht signifikant.

Zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt liegen die mittleren Distanzen zur Haltelinie zwischen 23.4 m und 17.9 m ($M = 21.7$ m) aus Mitfahrersicht sowie zwischen 18.8 m und 17.9 m ($M = 18.4$ m) aus der Außensicht schwächerer Verkehrsteilnehmer (siehe Abbildung 54 rechts). Aus Mitfahrersicht soll das automatisierte Fahrzeug geringfügig, aber nicht signifikant eher bremsen, wenn es sich einem kreuzenden Radfahrer nähert, als wenn es sich einem Fußgänger nähert. Die Richtung, aus der sich ein schwächerer Verkehrsteilnehmer der Einmündung nähert, wirkt sich dabei nicht signifikant unterschiedlich auf die Distanz des automatisierten Fahrzeugs zur Haltelinie zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt aus.

Aus der Außenperspektive ist die mittlere Distanz zur Haltelinie über alle Versuchsbedingungen hinweg nahezu identisch und liegt bei circa 19 m. Es gibt also einen Konsens zwischen Radfahrern und Fußgängern darüber, wann ein automatisiertes Fahrzeug beim Heranfahren an eine Einmündung spätestens beginnen sollte, zu bremsen.

Der Vergleich der mittleren Distanz zur Haltelinie zum idealen und letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt ergab, dass sich beide Werte signifikant voneinander unterscheiden ($t(212) = 19.76, p < .001, d = .83$). Der Mittelwertsunterschied ($M_{ideal} = 30.8$ m; $M_{letzter} = 20.2$ m) liegt bei ungefähr 10.6 m.

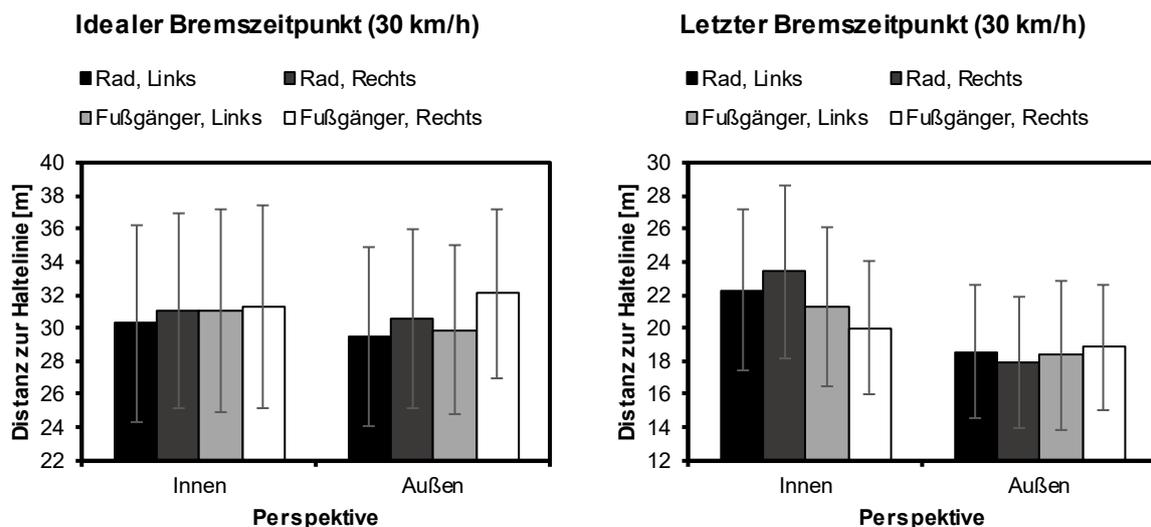


Abbildung 54: Links: Distanz zur Haltelinie zum idealen Bremszeitpunkt (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) bei 30 km/h in Abhängigkeit der Perspektive (P), Verkehrsteilnehmer (V) und Richtung (R). Rechts: Distanz zur Haltelinie beim letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) bei 30 km/h in Abhängigkeit der Perspektive (P), Verkehrsteilnehmer (V) und Richtung (R).

In Abbildung 55 sind die mittleren Distanzen des automatisierten Fahrzeugs zur Haltelinie zum idealen Bremszeitpunkt bei einer Anfahrtsgeschwindigkeit von 50 km/h dargestellt. Aus der Mitfahrersicht liegen die mittleren Distanzen zwischen 57.1 m und 51.0 m ($M = 53.3$ m) zur Haltelinie, wobei die Distanz bei der Interaktion mit Fußgänger geringfügig, aber nicht signifikant größer sind als bei der Interaktion mit Radfahrern. Die Richtung, aus

der sich ein schwächerer Verkehrsteilnehmer der Einmündung nähert, wirkt nicht signifikant auf die Distanz zur Haltelinie aus.

Aus der Außensicht zeigt sich im Vergleich zur Mitfahrersicht eine breitere Streuung der mittleren Distanz zur Haltelinie, wobei die Mittelwerte zwischen 53.2 m und 44.5 m liegen ($M = 49.2$ m). Insgesamt ist auffällig, dass Radfahrer einen späteren Bremsbeginn des automatisierten Fahrzeugs akzeptieren als Fußgänger, wobei sich die Richtung, aus der sich ein Radfahrer oder Fußgänger der Einmündung nähert, nur bei Radfahrern auf die Distanz zur Haltelinie auswirkt. Diese Mittelwertsunterschiede sind jedoch aufgrund der breiten Streuung nicht signifikant.

Weiterhin zeigt sich im Vergleich der Innen- und Außenperspektive, dass vor allem Radfahrer im Vergleich zu Fußgängern und Mitfahrern im hochautomatisierten Fahrzeug einen um circa 5 m bis 13 m späteren Bremsbeginn des automatisierten Fahrzeugs akzeptieren, wobei diese numerischen Unterschiede statistisch nicht signifikant sind.

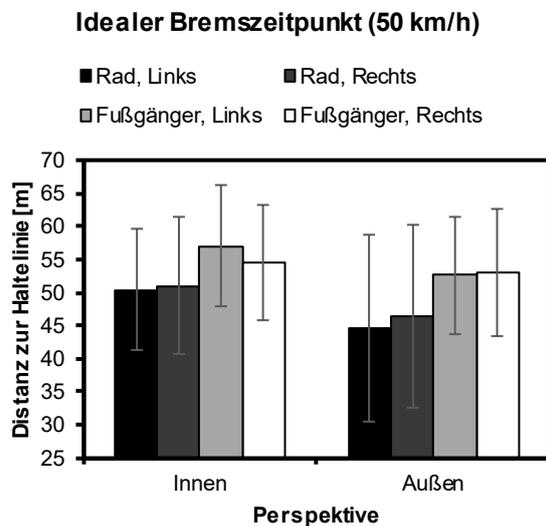


Abbildung 55: Distanz zur Haltelinie zum idealen Bremszeitpunkt (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) bei 50 km/h in Abhängigkeit der Perspektive (P), Verkehrsteilnehmer (V) und Richtung (R).

Abbildung 56 links zeigt die Wechselwirkung der beiden Einflussgrößen Verkehrsteilnehmer und Richtung auf die Distanz zur Haltelinie beim letzten akzeptierten Bremszeitpunkt bei einer Anfahrtgeschwindigkeit von 50 km/h. Hierbei ist zu beachten, dass die Einflussgröße Verkehrsteilnehmer sowohl die Innensicht eines Mitfahrers, als auch die Außensicht von Fußgängern und Radfahrern umfasst. Weiterhin sind die Richtungsangaben aus der Position des Mitfahrers im automatisierten Fahrzeug zu verstehen.

Entsprechend soll das automatisierte Fahrzeug früher bremsen, wenn ein Radfahrer von rechts kommt ($M = 31.8$ m), als wenn er von links an die Einmündung herankommt ($M = 29.1$ m). Möglicherweise liegt dieser Effekt darin begründet, dass Radfahrer normalerweise von links an eine Einmündung herankommen. Deutlich seltener fahren Radfahrer von rechts an eine Einmündung heran, was nur bei einer bidirektionalen Radverkehrsführung passiert. Entsprechend sind Autofahrer daran gewöhnt, dass ein Radfahrer von links kommt und überrascht, wenn diese Erwartungshaltung nicht erfüllt wird. Da Radfahrer um diese Erwartungshaltung wissen, ist anzunehmen, dass auch

Radfahrer in diesem Fall eine größere Distanz zum automatisierten Fahrzeug bevorzugen.

Bei Fußgängern ist der Richtungseffekt genau andersherum. Hier soll das automatisierte Fahrzeug etwas eher bremsen, wenn der Fußgänger die Einmündung von links kreuzt ($M = 36.0$ m), als von rechts ($M = 34.1$ m), wobei die Distanz zur Haltelinie bei Fußgängern etwas höher ist, als bei Radfahrern. Dies ist insofern nachvollziehbar, als dass Fußgänger der Gefahrensituation eher ausgeliefert sind, als Radfahrer. Hinzu kommt, dass eine höhere Anfahrtsgeschwindigkeit mit einem erheblichen größeren Personenschaden im Falle einer Kollision einhergeht als eine niedrigere Geschwindigkeit.

In Abbildung 56 rechts sind die mittleren Distanzen für alle Versuchsbedingungen zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt bei einer Anfahrtsgeschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs von 50 km/h dargestellt. Insgesamt zeigt sich ein ähnliches Ergebnismuster wie zum idealen Bremszeitpunkt.

Aus der Mitfahrersicht liegt die mittlere Distanz zwischen 36.4 und 38.3 m ($M = 36.4$ m), aus der Außensicht schwächerer Verkehrsteilnehmer zwischen 30.0 m und 33.6 m ($M = 31.8$ m). Bei diesen Ergebnissen ist insgesamt auffällig, dass Fußgänger und Radfahrer einen späteren Bremsbeginn des automatisierten Fahrzeugs und damit einhergehend eine geringere Distanz zur Haltelinie akzeptieren als Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug, wobei die Streuung aus der Außensicht deutlich größer ist als aus Mitfahrersicht. Daher sind diese Mittelwertsunterschiede statistisch nicht signifikant.

Der Vergleich der mittleren Distanzen des automatisierten Fahrzeugs zur Haltelinie zum idealen und zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt zeigt, dass sich die Mittelwerte signifikant voneinander unterscheiden ($t(227) = 19.32$, $p < .001$, $d = .65$). Der Mittelwertsunterschied ($M_{ideal} = 51.3$ m; $M_{letzter} = 34.2$ m) liegt bei ungefähr 17.1 m.

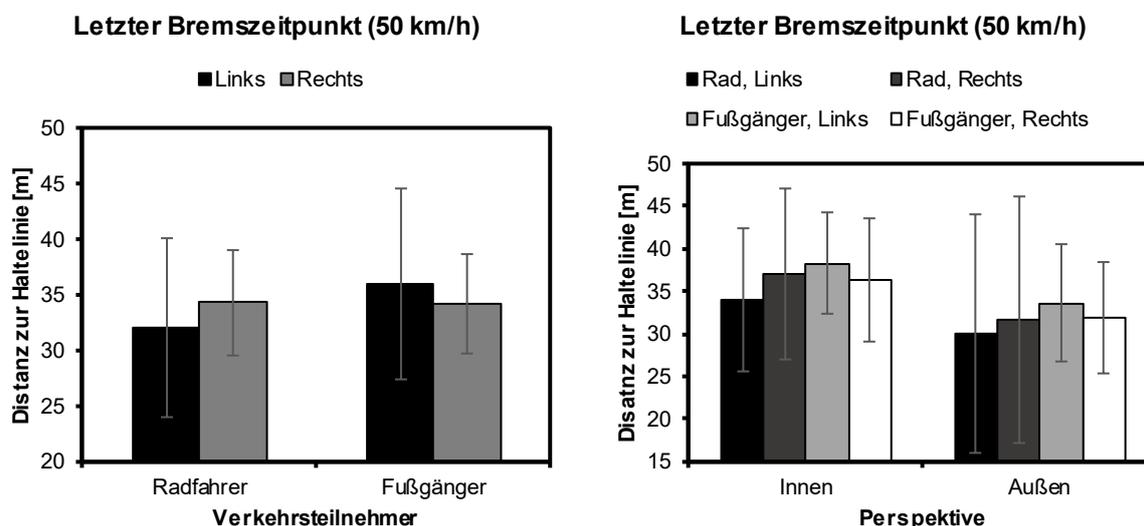


Abbildung 56: Distanz zur Haltelinie zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) bei 50 km/h in Abhängigkeit der Einflussgrößen Verkehrsteilnehmer (V) und Richtung (R). Rechts: Distanz zur Haltelinie zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) bei 50 km/h in Abhängigkeit der Perspektive (P), Verkehrsteilnehmer (V) und Richtung (R).

Insgesamt lässt sich für die Distanz des automatisierten Fahrzeugs zur Haltelinie zum idealen bzw. zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt folgendes festhalten:

- Bei einer Anfahrtgeschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs von 30 km/h sollte das automatisierte Fahrzeug aus Mitfahrsicht idealerweise ungefähr 31 m vor der Einmündung mit dem Bremsvorgang beginnen, spätestens aber 22 m (Mitfahrsicht) bzw. 18 m (Fußgänger- und Radfahrsicht) vor der Haltelinie.
- Bei einer Anfahrtgeschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs von 50 km/h sollte das automatisierte Fahrzeug ungefähr 53 m (Mitfahrsicht) bzw. 49 m (Fußgänger- und Radfahrsicht) vor der Haltelinie mit dem Bremsvorgang beginnen, spätestens aber spätestens aber 36 m (Mitfahrsicht) bzw. 31 m (Fußgänger- und Radfahrsicht) vor der Haltelinie.
- Zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt bei einer Anfahrtgeschwindigkeit von 50 km/h sollen ein automatisiertes Fahrzeug etwas eher bremsen, wenn es auf einen kreuzenden Fußgänger zufährt, als auf einen Radfahrer. Zusätzlich zum Verkehrsteilnehmer (Radfahrer, Fußgänger) ist auch die Richtung, aus der ein schwächerer Verkehrsteilnehmer die Einmündung kreuzt, zu berücksichtigen. Kreuzt ein Radfahrer von rechts, ist ein größerer Abstand zur Haltelinie bei Bremsbeginn notwendig, als wenn der Radfahrer von links kreuzt.

5.2.3.2 Erlebtes Risiko

Bei der Bewertung des erlebten Risikos zum idealen bzw. letzten akzeptierten Bremszeitpunkt ergab das linear-mixed Modell weder signifikante Hauptwirkungen der Einflussgrößen (Faktor A: Perspektive, Faktor B: Verkehrsteilnehmer, Faktor C: Richtung), noch signifikante Wechselwirkungen zwischen diesen untersuchten Einflussgrößen. Die vollständigen Ergebnisse der Varianzanalyse sind in Tabelle 22 zusammengefasst. Bei den folgenden Beschreibungen der numerischen Unterschiede zwischen den Bedingungen ist unbedingt zu beachten, dass diese nicht statistisch signifikant sind. Vielmehr liegen die Mittelwerte in den einzelnen Bedingungen innerhalb einer Streubreite, was anhand der 95 % Vertrauensintervalle in den einzelnen Grafiken deutlich wird. Jedoch ist es für die Einordnung der Ergebnisse im inhaltlichen Gesamtkontext wichtig, diese zu beschreiben, auch wenn die Unterschiede nicht signifikant sind.

Tabelle 22: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf das erlebte Risiko zum idealen und letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt.

		<i>F</i>	<i>df</i>	<i>p</i>	
30 km/h	Erlebtes Risiko zum idealen Bremszeitpunkt	Perspektive (P)	0.10	1,82.9	.923
		Verkehrsteilnehmer (V)	1.08	1,82.9	.302
		Richtung (R)	0.10	1,74.6	.754
		P x V	3.55	1,82.9	.063
		P x R	1.55	1,74.6	.217
		V x R	0.71	1,74.6	.402
		P x V x R	0.07	1,74.6	.799
	Erlebtes Risiko zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt	P	2.89	1,101.5	.092
		V	2.39	1,101.5	.125
		R	0.08	1,77.1	.777
		P x V	0.28	1,101.5	.601
		P x R	0.09	1,77.1	.771
		V x R	0.03	1,77.1	.869
		P x V x R	0.04	1,77.1	.846
50 km/h	Erlebtes Risiko zum idealen Bremszeitpunkt	P	1.64	1,98.2	.203
		V	0.00	1,98.2	.997
		R	0.69	1,77.0	.408
		P x V	0.34	1,98.2	.562
		P x R	0.70	1,77.0	.405
		V x R	1.01	1,77.0	.318
		P x V x R	0.44	1,77.0	.508
	Erlebtes Risiko zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt	P	0.20	1,108.5	.654
		V	1.32	1,108.5	.254
		R	2.81	1,97.3	.097
		P x V	2.56	1,108.5	.112
		P x R	0.42	1,97.3	.519
		V x R	0.81	1,97.3	.371
		P x V x R	0.61	1,97.3	.435

Abbildung 57 links zeigt die mittleren Risikobewertungen zum idealen und zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt für alle Varianten des Fahr Szenarios bei einer Anfahrtgeschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs von 30 km/h. Über alle Versuchsbedingungen hinweg liegen die mittleren Distanzen zur Haltelinie zu beiden Bremszeitpunkten in der unteren Hälfte der Risikoskala zwischen den Skalenpunkten 1 (= harmlos) und 4 (= sehr unangenehm). Insgesamt liegen die mittleren Risikobewertungen also im unangenehmen, jedoch nicht im gefährlichen Bereich.

Zum idealen Bremszeitpunkt sind die mittleren Risikobewertungen aus Mitfahrersicht für alle vier Versuchsbedingungen nahezu identisch (siehe Abbildung 57 links), und liegen zwischen den Skalenpunkten 1 (= harmlos) und 2 (= wenig unangenehm). Aus der Außensicht schwächerer Verkehrsteilnehmer ist die Streuung der mittleren Risikobewertungen zum idealen Bremszeitpunkt etwas größer, aber die auch hier liegen die Bewertungen zum idealen Bremszeitpunkt des automatisierten Fahrzeugs zwischen den Skalenpunkten 1 (= harmlos) und 2 (= wenig unangenehm). Somit lässt sich festhalten, dass sowohl Mitfahrer, als auch schwächere Verkehrsteilnehmer das erlebte Risiko idealerweise so gering wie möglich halten möchten.

Zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt des automatisierten Fahrzeugs sind die mittleren Risikobewertungen aus Mitfahrersicht bei einer Interaktion mit einem Fußgänger etwas höher als in der Interaktion mit einem Radfahrer (siehe Abbildung 57 rechts). Insgesamt streuen die Mittelwerte um den Skalenpunkt 3 (= mittel unangenehm).

Aus der Außensicht schwächerer Verkehrsteilnehmer sind die mittleren Risikobewertungen nahezu identisch, und liegen zwischen den Skalenpunkten 3 (= mittel unangenehm) und 4 (= sehr unangenehm). Somit sind die mittleren Risikobewertungen aus der Außensicht schwächeren Verkehrsteilnehmer etwas, aber nicht signifikant höher als aus der Innensicht eines Mitfahrers im automatisierten Fahrzeug.

Im Vergleich unterscheiden sich die mittleren Risikobewertungen zwischen dem idealen und dem letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt signifikant voneinander ($t(212) = 13.63$, $p < .001$, $d = .25$). Der Mittelwertsunterschied ($M_{\text{ideal}} = 1.6$; $M_{\text{letzter}} = 3.3$) beträgt ungefähr 1.7 Skalenpunkte und die mittleren Risikobewertungen streuen zwischen den Skalenpunkten 1 (= harmlos) und 4 (= sehr unangenehm).

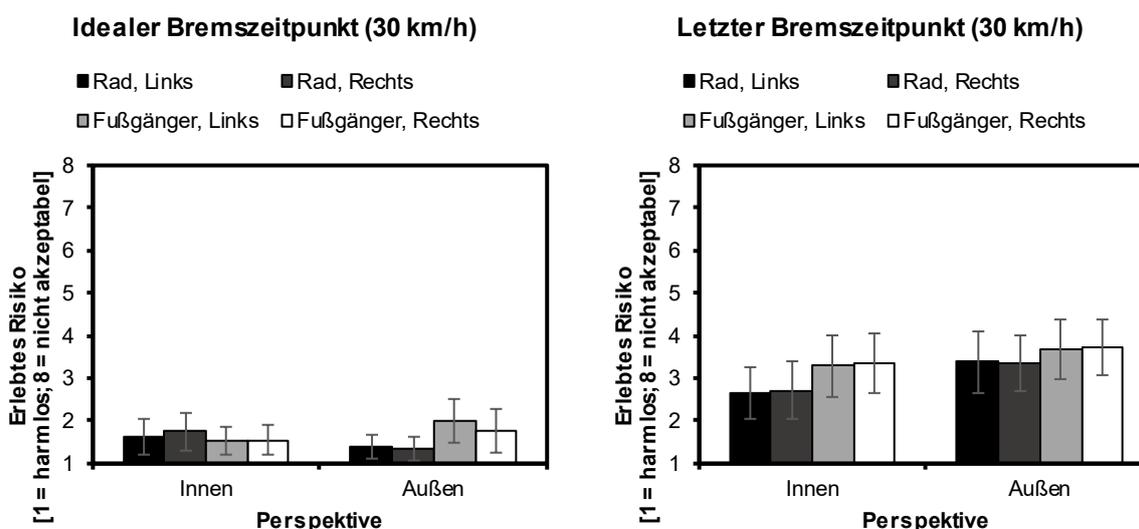


Abbildung 57: Links: Risikobewertung zum idealen Bremszeitpunkt bei 30 km/h (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Perspektive (P), Verkehrsteilnehmer (V) und Richtung (R). Rechts: Risikobewertung beim letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) bei 30 km/h in Abhängigkeit der Perspektive (P), Verkehrsteilnehmer (V) und Richtung (R).

Abbildung 58 zeigt die mittleren Risikobewertungen zum idealen und zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt für alle Varianten des Fahr Szenarios bei einer Anfahrtgeschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs von 50 km/h. Insgesamt zeigt sich über beide Bremszeitpunkte hinweg ähnliche Ergebnisse wie zuvor bei 30 km/h. Auch hier liegen die mittleren Risikobewertungen in der unteren Hälfte der Risikoskala zwischen den Skalenpunkten 1 (= harmlos) und 4 (= sehr unangenehm) und liegen somit durchweg im unangenehmen, jedoch nicht im gefährlichen Bereich.

Hinsichtlich der Risikobewertungen zum idealen Bremszeitpunkt zeigen sich bei einer Anfahrtgeschwindigkeit von 50 km/h ein ähnliches Ergebnismuster wie zuvor für die Anfahrtgeschwindigkeit von 30 km/h berichtet (siehe Abbildung 58 links). Aus Mitfahrersicht sind auch bei 50 km/h die mittleren Risikobewertungen zum idealen Bremszeitpunkt für alle erlebten Variationen des Fahr Szenarios nahezu identisch und liegen zwischen den Skalenpunkten 1 (= harmlos) und 2 (= wenig unangenehm). Aus der Außensicht schwächerer Verkehrsteilnehmer streuen die mittleren Risikobewertungen um den Skalenpunkt 2 (= wenig unangenehm), wobei die Risikobewertungen von Fußgängern und Radfahrern nahezu identisch sind.

Zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt (siehe Abbildung 58 rechts) sind die mittleren Risikobewertungen aus Mitfahrersicht über alle Versuchsbedingungen hinweg nahezu identisch und streuen um den Skalenpunkt 3 (= mittel unangenehm). Demgegenüber zeigen sich aus der Außensicht Bewertungsunterschiede zwischen den Versuchsbedingungen. Hier fallen die mittleren Risikobewertungen aus Fußgängersicht numerisch etwas, aber nicht signifikant höher aus als aus Radfahrersicht. Aus Radfahrersicht streuen die Risikobewertungen um den Skalenpunkt 3 (= mittel unangenehm), aus Fußgängersicht liegen die Mittelwerte zwischen den Skalenpunkten 3 (= mittel unangenehm) und 4 (= sehr unangenehm).

Insgesamt unterscheiden sich die mittleren Risikobewertungen zum idealen und letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt bei einer Anfahrtsgeschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs von 50 km/h signifikant voneinander ($t(227) = 13.00, p < .001, d = .96$). Der Mittelwertsunterschied ($M_{ideal} = 2.0; M_{letzter} = 3.4$) beträgt ungefähr 1.4 Skalenpunkten und die mittleren Risikobewertungen streuen zwischen den Skalenpunkten 2 (= wenig unangenehm) und 4 (= sehr unangenehm).

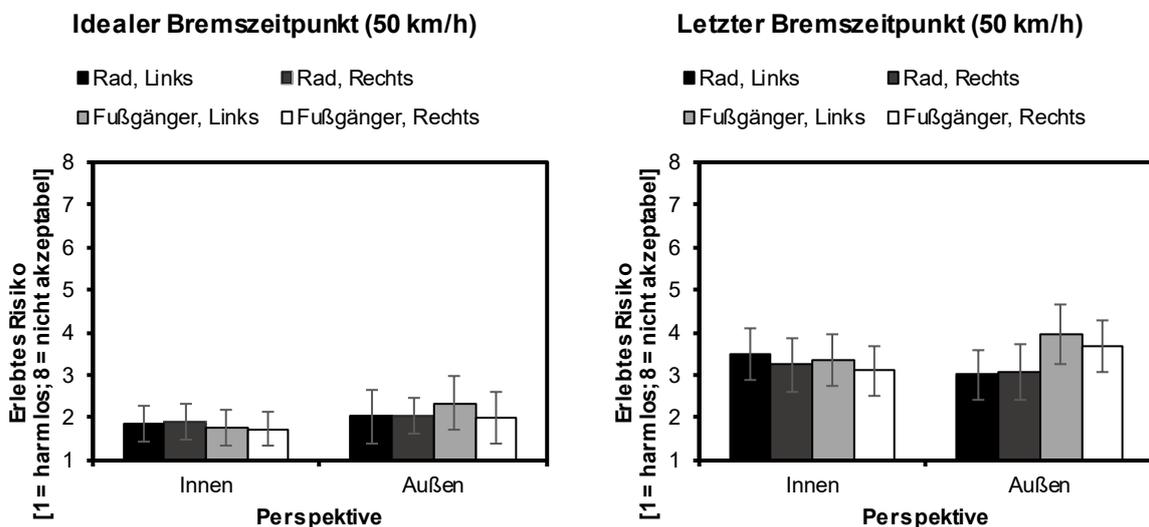


Abbildung 58: Links: Risikobewertung zum idealen Bremszeitpunkt bei 50 km/h (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit der Perspektive (P), Verkehrsteilnehmer (V) und Richtung (R). Rechts: Risikobewertung beim letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) bei 50 km/h in Abhängigkeit der Perspektive (P), Verkehrsteilnehmer (V) und Richtung (R).

Insgesamt lässt sich für die Risikobewertung zum idealen und letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt folgendes festhalten:

- Die Ergebnisse der Risikobewertungen deuten insgesamt darauf hin, dass alle Verkehrsteilnehmer das erlebte Risiko in der Interaktion mit automatisierten Fahrzeugen zu minimieren möchten, was sich in den mittleren Risikobewertungen zum idealen Bremszeitpunkt zeigt.
- Diese Tendenz wird auch zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt deutlich. Hier akzeptieren Mitfahrer und schwächere Verkehrsteilnehmer ein automatisiertes Fahrverhalten, welches sie höchstens als sehr unangenehm, aber nicht als

gefährlich bewerten. Das bedeutet, dass Menschen diesen gefährlichen, riskanten Bereich möglichst vermeiden wollen.

- Beim Vergleich der Innen- und Außensicht fällt auf, dass insbesondere Fußgänger ein geringfügig, aber nicht signifikant größeres Risiko erleben.

Um eine möglichst niedrige Risikobewertung aus Sicht aller beteiligten Verkehrsteilnehmer (Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug, Fußgänger, Radfahrer) zu erreichen, empfiehlt sich für die Anpassung einer automatisierten Fahrfunktion Folgendes:

- Um eine möglichst risikoarme Auslegung der automatisierten Fahrfunktion zu erreichen, ist für den Bremsbeginn eine Orientierung an der Distanz zum idealen Bremszeitpunkt zu empfehlen. Diese liegen in einem Wertebereich zwischen 49 m bis 53 m Distanz zur Haltelinie bei einer Anfahrtgeschwindigkeit 50 km/h und bei 31 m bei 30 km/h.

5.2.4 Diskussion

Die Onlinestudie untersuchte aus der Innensicht von Mitfahrern und aus der Außensicht schwächerer Verkehrsteilnehmer (Radfahrer, Fußgänger), wann ein hochautomatisiertes Fahrzeug beim Heranfahren an eine Einmündung beginnen soll, abzubremsen, damit sich die beteiligten Verkehrsteilnehmer in der Interaktion mit dem Fahrzeug sicher fühlen. Dazu wurden eine Einmündungssituation im statischen Fahrsimulator umgesetzt. Dabei wurden die Anfahrtgeschwindigkeit des hochautomatisierten Fahrzeugs an die Einmündung (30 km/h, 50 km/h), die Perspektive des Verkehrsteilnehmers (innen, außen), der Verkehrsteilnehmer (Fußgänger, Radfahrer) sowie die Richtung, aus der der schwächere Verkehrsteilnehmer die Einmündung kreuzt (links, rechts) variiert. Aufgrund der Coronapandemie konnte die Studie jedoch nicht im Fahrsimulator stattfinden. Stattdessen wurde die Studie als Videostudie online durchgeführt. Deshalb wurden alle Varianten des Fahr Szenarios aus allen drei Perspektiven im Fahrsimulator abgefilmt und Videos von jeweils circa 20 bis 25 Sekunden Länge produziert. In der Onlinestudie nahmen die Probanden jeweils einer der drei Positionen ein. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, die Distanz zur Haltelinie zum idealen Bremszeitpunkt sowie zum letzten, akzeptierten Zeitpunkt manuell einzustellen. Nach jeder manuellen Einstellung sahen die Probanden ein Video mit der ausgewählten Distanz bzw. mit wenigen Metern Abweichung. Nach einer möglichen Korrektur dieser eingestellten Distanz bewerteten die Probanden ihr erlebtes Risiko. Dieses Vorgehen wurde auf alle Varianten des Fahr Szenarios angewendet.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Onlinestudie im Hinblick auf die Forschungsfragen zusammengefasst, diskutiert und methodisch bewertet.

Welchen Bremsbeginn präferieren Mitfahrer im hochautomatisierten Fahrzeug, wenn das Fahrzeug, in dem sie sich befinden, auf eine Einmündung zufährt und einem schwächeren Verkehrsteilnehmer Vorfahrt gewähren muss? Welchen Bremsbeginn finden Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug im Hinblick auf ihr erlebtes Risiko gerade noch akzeptabel?

Insgesamt bewerteten Mitfahrer die Interaktionen mit den schwächeren Verkehrsteilnehmern als harmlos bis sehr unangenehm, aber im Mittel nicht als gefährlich. Zum idealen Bremszeitpunkt lagen die mittleren Risikobewertungen zwischen harmlos und wenig unangenehm, wobei das mittlere erlebte Risiko bei einer Anfahrtgeschwindigkeit von 50 km/h nur geringfügig höher war als bei 30 km/h. Zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt lagen die mittleren Risikobewertungen dann im unangenehmen Bereich, wobei es aus Mitfahrersicht keinen Unterschied in der mittleren Risikobewertung zwischen der Anfahrtgeschwindigkeit von 30 km/h und 50 km/h gab.

Diese Ergebnisse deuten insgesamt darauf hin, dass Mitfahrer im Idealfall versuchen, ein erwartetes Risiko in der Interaktion mit schwächeren Verkehrsteilnehmern zu vermeiden bzw. so gering wie möglich zu halten. Entsprechend zeitig stoppten die Mitfahrer die Videos, damit die Interaktion nicht „gefährlich“ wurde. Das entspricht vom Grundgedanken der *Zero Risk Theory* (Näätänen, & Summala, 1974, 1976; Summala, 1988), die davon ausgeht, dass Fahrer Risiken mithilfe von großen Abständen (*safety margins*) zu möglichen Gefahrenquellen kontrolliert werden, sodass idealerweise gar kein Risiko erlebt wird. Vor diesem Hintergrund sprechen die Ergebnisse gegen die *Risk Homeostasis Theory* (Wilde, 1982), da „risikoreiche“ Interaktionen gar nicht erst entstehen, die austariert werden müssten. Hierbei ist zu beachten, dass „risikoreiche“ Interaktionen in den Bereich „gefährlich“ auf der Risikoskala fallen.

Diese klare Tendenz zur Risikovermeidung ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass menschliche Fahrer bislang noch keine Erfahrung als Mitfahrer in einem hochautomatisierten Fahrzeug haben. Hier könnten mittel- und langfristig Gewöhnungseffekte an Bedeutung gewinnen, sodass Mitfahrer zunehmend dynamischer gefahren werden möchten. Daher ist die Präferenz der Mitfahrer hinsichtlich des Fahrverhaltens möglicherweise eine Momentaufnahme, welche sich mit zunehmender Erfahrung mit diesen Systemen verändern könnte. Ob, und wenn ja, inwiefern sich die Präferenzen von Mitfahrern hinsichtlich des Fahrverhaltens eines automatisierten Fahrzeugs verändern, sollte Gegenstand weiterer Forschung sein.

Zum idealen Bremszeitpunkt lag die mittlere Distanz zur Haltelinie bei ungefähr 31 m (30 km/h) bzw. bei 53 m (50 km/h). Zum letzten, akzeptierten Zeitpunkt zwischen 22 m (30 km/h) bzw. bei 36 m (50 km/h). Diese Werte spannen den Bereich auf, in dem Mitfahrer das Fahrverhalten eines automatisierten Fahrzeugs akzeptieren. Das bedeutet für die technische Auslegung hochautomatisierter Fahrfunktionen insgesamt, dass Mitfahrer eine frühzeitige Verhaltensreaktion des automatisierten Systems wünschen. Dies dient einerseits als Zeichen dafür, dass das System die Situation als Ganzes verstanden hat und darauf in angemessener Weise reagieren wird. Dazu gehört, dass der schwächere Verkehrsteilnehmer detektiert wurde, und das System versteht, dass es diesem die Vorfahrt gewähren muss. Andererseits trägt dies dazu bei, um sich rücksichtsvoll gegenüber anderen (schwächeren) Verkehrsteilnehmern zu verhalten. Es ist denkbar, dass Mitfahrer gerne von einem Fahrzeug mit „vorbildlicher“ Fahrweise, welche von anderen Verkehrsteilnehmern in der Fahrumgebung als positiv bewertet wird, gefahren werden möchten. Dazu gehört, dass schwächere Verkehrsteilnehmer die Interaktion mit diesem Fahrzeug als risikoarm wahrnehmen, was sich auch so in den Ergebnissen aus der Außenperspektive schwächerer Verkehrsteilnehmer zeigte. So fühlen sich auch Mitfahrer im hochautomatisierten Fahrzeug wohl und lassen sich auch weiterhin gerne fahren.

Aus Mitfahrersicht sind gefährliche Interaktionen bzw. (Fast-)Kollisionen mit einem schwächeren Verkehrsteilnehmer auch deshalb zu vermeiden, da sich Mitfahrer in dieser Situation möglicherweise für einen Personenschaden verantwortlich fühlen könnten,

obwohl die Fahraufgabe und somit auch die Verantwortung beim hochautomatisierten Fahrzeug lagen. Im Hinblick auf die Akzeptanz solcher Systeme sind gefährliche Interaktionen oder (Fast-)Kollisionen mit schwächeren Verkehrsteilnehmern möglicherweise schädlich, da automatisiertes Fahren besonders im Fokus medialer Aufmerksamkeit steht (Grunwald, 2015). Ein Beispiel dafür ist die Berichterstattung zu einer Kollision eines selbstfahrenden Uber Fahrzeugs mit einer Fußgängerin in Tempe, Arizona (siehe NTSB, 2019). Ausgehend von diesen beiden Argumenten ist es nachvollziehbar, dass Mitfahrer einen frühen Bremsbeginn des automatisierten Fahrzeugs bevorzugten.

Zum letzten, akzeptierten Zeitpunkt sind neben dem Verkehrsteilnehmer zusätzlich auch die Richtung, aus der ein schwächerer Verkehrsteilnehmer kommt, entscheidend für die Distanz zur Haltelinie. Hier zeigt sich über den beschriebenen Effekt des Verkehrsteilnehmers hinaus, dass das automatisierte Fahrzeug früher bremsen soll, wenn ein Radfahrer von rechts kommt, als wenn dieser von links an die Einmündung heranzieht. Möglicherweise liegt dieser Effekt darin begründet, Autofahrer daran gewöhnt sind, dass ein Radfahrer normalerweise von links kommt und nur bei bidirektionaler Radverkehrsführung von rechts an eine Einmündung heranzieht. Da bidirektionale Radverkehrsführung deutlich seltener ist, soll das automatisierte System entsprechend diese Besonderheit der Infrastruktur berücksichtigen, und darauf mit einer Verhaltensanpassung reagieren.

Fraglich bleibt, ob diese Unterscheidung der Art des Verkehrsteilnehmers und der Richtung, aus der ein Fußgänger oder Radfahrer kommt, bei der Trajektorienplanung eines automatisierten Fahrzeugs berücksichtigt werden sollte. Solche Anpassungen des automatisierten Fahrverhaltens setzen, voraus, dass schwächere Verkehrsteilnehmer zuverlässig identifiziert vom automatisierten System identifiziert und deren zu erwartende Trajektorie präzise vorhergesagt wird.

Welchen Bremsbeginn präferieren schwächere Verkehrsteilnehmer an der Einmündung, der sich ein hochautomatisiertes Fahrzeug mit verschiedenen Geschwindigkeiten nähert? Welchen Bremsbeginn finden schwächere Verkehrsteilnehmer im Hinblick auf ihr erlebtes Risiko gerade noch akzeptabel?

Aus der Außensicht von Radfahrern und Fußgängern war das Vorgehen der Onlinestudie analog zu dem aus Mitfahrersicht. Die Probanden näherten sich der Einmündung, und stoppten das Video zum idealen Bremszeitpunkt. Auf Basis dieser Entscheidung ergab sich die Distanz des hochautomatisierten Fahrzeugs zur Haltelinie bei Bremsbeginn. Dann sahen die Fußgänger bzw. Radfahrer ihre Entscheidung in einem weiteren Video. Nach einer möglichen Korrektur der Distanz bewerteten die Probanden ihr erlebtes Risiko in der erlebten Fahrsituation. Anschließend wurde dasselbe Vorgehen auf den letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt angewendet.

Über alle Variationen und beide Bremszeitpunkte hinweg bewerteten Fußgänger und Radfahrer das erlebte Risiko in der Interaktion mit dem automatisierten Fahrzeug als harmlos bis sehr unangenehm, aber im Mittel nicht als gefährlich, wobei Fußgänger die Interaktion im Mittel als geringfügig unangenehmer einschätzten als Radfahrer. Dieses Ergebnis ist möglicherweise dadurch zu erklären, dass sich Fußgänger langsamer fortbewegen als Radfahrer, sodass sie im Zweifel einer Gefahrensituation langsamer „entkommen“ können. Im Vergleich zur Mitfahrersicht liegen die mittleren Risikobewertungen der schwächeren Verkehrsteilnehmer auf einem ähnlichen Niveau,

sodass auch die Ergebnisse aus der Außensicht schwächerer Verkehrsteilnehmer für die *Zero Risk Theory* (Näätänen & Summala, 1974, 1976; Summala, 1988) sprechen.

Bei der Distanz zur Haltelinie sind die Präferenzen von Fußgängern und Radfahrern in Abhängigkeit der Geschwindigkeit etwas, aber nicht signifikant unterschiedlich. Bei einer niedrigen Anfahrtgeschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs (30 km/h) sind Präferenzen von Fußgängern und Radfahrern bis auf wenige Meter gleich. Bei einer höheren Anfahrtgeschwindigkeit (50 km/h) zeigt sich jedoch, dass Fußgänger einen etwas, aber nicht signifikant früheren Bremsbeginn bevorzugen als Radfahrer, zumindest zum idealen Bremszeitpunkt. Dieses Ergebnis bestätigt Befunde aus vorangegangenen Studien zur Interaktion von Fußgängern mit hochautomatisierten Fahrzeugen. Diese fanden, dass Fußgänger einen frühen Bremsbeginn des hochautomatisierten Fahrzeugs bevorzugen (Fuest et al., 2018; 2019). Zum einen um eine frühzeitige Rückmeldung vom Fahrzeug zu bekommen, dass sie vom hochautomatisierten System detektiert, also „gesehen“ wurden (Rothenbücher et al., 2016); zum anderen, um das Fahrzeug länger beobachten zu können, um Verhaltensabsicht des hochautomatisierten Fahrzeugs (Vorlassen, Selbst fahren) eindeutig zu erkennen und das eigene Verhalten (Gehen vs. Stehen bleiben) entsprechend daran anzupassen (Fuest et al., 2018, 2019).

Das Weiteren sind Radfahrer im Unterschied zu Fußgängern in der Regel schneller unterwegs. Das führt dazu, dass Radfahrer ihren Abstand zum automatisierten Fahrzeug als Gefahrenquelle schneller vergrößern können. Gleichzeitig ist dadurch die Interaktion mit dem automatisierten Fahrzeug von der Dauer her kürzer. Zusammen führen diese beiden Aspekte möglicherweise dazu, dass Radfahrer einen etwas geringeren Abstand zum automatisierten Fahrzeug bzw. einen etwas späteren Bremsbeginn akzeptieren, als Fußgänger das tun. Dennoch deuten die Ergebnisse dieser Studie darauf hin, dass sich auch Radfahrer eine frühzeitige Verhaltensreaktion des automatisierten Fahrzeugs wünschen.

5.2.5 Zusammenfassung Studie 2: Anpassung der automatisierten Fahrfunktion an einer Einmündung

Unter Berücksichtigung des erlebten Risikos von Mitfahrern (Innensicht), Fußgängern und Radfahrern (Außensicht) scheint die folgende Auslegung einer automatisierten Fahrfunktion sinnvoll:

- Bei einer Anfahrtgeschwindigkeit von 30 km/h sollte das automatisierte Fahrzeug zwischen 31 m (idealer Bremszeitpunkt) und 22 m (letzter, akzeptierter Bremszeitpunkt) vor der Haltelinie beginnen, zu bremsen.
- Bei einer Anfahrtgeschwindigkeit von 50 km/h sollte das automatisierte Fahrzeug zwischen 53 m (idealer Bremszeitpunkt) und 36 m (letzter, akzeptierter Bremszeitpunkt) vor der Haltelinie beginnen, zu bremsen.

Durch diese Anpassungen liegt das erlebte Risiko der beteiligten Verkehrsteilnehmer maximal im unangenehmen, aber nicht im risikoreichen bzw. gefährlichen Bereich. Um das erlebte Risiko so gering wie möglich zu halten, empfiehlt sich eine Orientierung an der mittleren Distanz zur Haltelinie zum idealen Bremszeitpunkt.

Weiterhin ist es bei einer höheren Geschwindigkeit von 50 km/h, zumindest zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt, möglicherweise sinnvoll, die Auslegung der automatisierten Fahrfunktion an den Verkehrsteilnehmer (Fußgängern und Radfahrer) sowie an die

Richtung, aus der sich diese der Einmündung annähern, anzupassen. Entsprechend könnte es sinnvoll sein, dass ein automatisiertes Fahrzeug eher abbremst, wenn ein Radfahrer von rechts kreuzt.

5.2.6 Methodische Bewertung

Mit der Onlinestudie ist gelungen, einen ersten Eindruck zu erhalten, wie sich ein hochautomatisiertes Fahrzeug in einer typischen Interaktionssituation im urbanen Raum verhalten sollte, damit sich die beteiligten menschlichen Verkehrsteilnehmer sowohl aus der Innensicht, als auch aus der Außensicht (ausreichend) sicher fühlen bzw. in welchem Ausmaß Verkehrsteilnehmer überhaupt ein erlebtes Risiko im Umgang mit einem automatisierten Fahrzeug akzeptieren. Zusätzlich liefert die Studie erste Hinweise darauf, in welchem Bereich ein möglicher Spielraum für die technische Auslegung der Systeme vorhanden ist.

Die Ergebnisse dieser Studie unterliegen allerdings einigen methodischen Einschränkungen. Diese Einschränkungen sind vor allem darauf zurückzuführen, dass die Studie online und nicht im Fahrsimulator durchgeführt wurde. Ein wesentlicher Nachteil von Onlinestudien, bei denen sich Probanden Videos einer Interaktionssituation anschauen, ist die verminderte, bzw. sogar fehlende Immersion. Das bedeutet, dass der subjektive Eindruck, sich in einer realen Fahrsituation zu befinden, beim Ansehen von Videos wesentlich schwächer ausgeprägt ist, als im Fahrsimulator. Dieses führte in der Onlinestudie möglicherweise zu einer Unterschätzung des erlebten Risikos in den zu bewertenden Interaktionssituationen. Ebenso war durch die verschiedentliche Darstellung der Videos auf unterschiedlichen Bildschirmen die Tiefen- und Größenwahrnehmung der Probanden möglicherweise beeinträchtigt, sodass es für die Probanden schwieriger war, Distanzen in den Videos korrekt einzuschätzen. Dieses hat neben einem verminderten erlebten Risiko, möglicherweise zu geringen ausgewählten Distanzen zur Haltelinie zum idealen und insbesondere zum letzten, akzeptierten Zeitpunkt geführt. Entsprechend sind die ermittelten Distanzen des automatisierten Fahrzeugs zur Haltelinie bei Bremsbeginn als eine erste Orientierung für die Auslegung hochautomatisierter Fahrfunktionen in dieser Fahrsituation zu verstehen. Gleichzeitig bieten die im Rahmen dieser Onlinestudie gewonnenen Erkenntnisse als gute Grundlage für die weitere Validierung dieser Werte im Rahmen weiterer Studien im Fahrsimulator und schlussendlich auch im Realfahrzeug.

Über den Wahrnehmungsaspekt hinaus haben Onlinestudie im Gegensatz zum experimentellen Setting einer Fahrsimulatorstudie den Nachteil, dass es keine Kontrolle über den experimentellen Prozess gibt. Im Nachhinein ist nicht nachvollziehbar unter welchen äußeren Bedingungen die Probanden an der Onlinestudie teilgenommen haben. Die Probanden waren zwar aufgefordert, die Studie auf einem Laptop oder Tablet an in einem ruhigen Umfeld durchzuführen, jedoch kann dieses Umfeld im Rahmen der Onlinestudie weder vom Versuchsleiter hergestellt, noch kontrolliert werden. Zur Qualitätssicherung des Studienablaufs wurde eine Pilotstudie durchgeführt, um die Verständlichkeit der Instruktionen sicherzustellen (siehe Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Dennoch ist es nicht möglich, zu kontrollieren, ob die Probanden alle Instruktionen genau verstanden haben, und ihnen die Aufgabenstellung zu jedem Zeitpunkt klar war. Aufgrund dieser methodischen Einschränkungen ist es empfehlenswert die gewonnenen Erkenntnisse im Rahmen eines kontrollierten, experimentellen Settings mit Versuchsleiter zu prüfen.

Hinsichtlich der Auslegung automatisierter Fahrfunktionen ist weiterhin zu beachten, dass in dieser Studie lediglich der Bremszeitpunkt, wann ein hochautomatisiertes Fahrzeug beginnen soll, auf einen bestimmten Punkt (in diesem Fall die Haltelinie) zu bremsen. Hierbei wurden zwei Aspekte des Bremsverhaltens außer Acht gelassen. Zum einen wurde nicht untersucht, wie degressiv das Bremsverhalten des hochautomatisierten Fahrzeugs sein soll, d.h. soll das Fahrzeug erst stärker verzögern, um sich dann ausrollen zu lassen oder soll die Verzögerung gleichmäßiger sein? Zum anderen gab es keine physische Rückkopplung der Bremsung aus Mitfahrersicht, da die Probanden die Bremsung nur visuell durch die Videos erlebten.

Physische Aspekte sind jedoch auch von entscheidender Bedeutung dafür, wie komfortabel Mitfahrer die hochautomatisierte Fahrt wahrnehmen (Elbanhawi et al., 2015). Studien zum Fahrkomfort beim hochautomatisierten Fahren fanden übereinstimmend, dass laterale und longitudinale Beschleunigung sowie der Ruck beim Abbremsen möglichst geringgehalten werden sollte, damit sich Mitfahrer wohlfühlen (Bellem et al., 2018; Griesche et al., 2016). Bremsen ein hochautomatisiertes Fahrzeug (zu) stark, so führt dieses Verhalten zu einer Steigerung des Diskomforts des Mitfahrers. Dieses Fahrverhalten würde für eine (zu) späte Reaktion oder eine Fehlinterpretation der Umweltfaktoren durch das hochautomatisierte Fahrzeug sprechen, was sich wiederum negativ auf das Vertrauen auswirken könnte. Somit ist einerseits zu prüfen, wie das umgesetzte Bremsverhalten in Abhängigkeit des Bremszeitpunkts aus Mitfahrersicht wirkt. Andererseits sind unterschiedliche Bremsvorgänge miteinander zu vergleichen. Möglicherweise sind Menschen im Umgang mit dieser neuen Technologie im urbanen Mischverkehr auch erst vorsichtiger, und möchten daher anfangs defensiver gefahren werden. Mit zunehmender (positiver) Erfahrung mit diesen Systemen werden Menschen möglicherweise auch risikobereiter. Langzeiteffekte automatisierten Fahrens sind für den urbanen Kontext in zukünftigen Studien und Fahrversuchen zu untersuchen.

Hinsichtlich der Messmethodik ist zu beachten, dass die Probanden den Bremsbeginn des hochautomatisierten Fahrzeugs selbst bestimmten, und diese, falls notwendig, nochmal korrigieren konnten. Dieses Vorgehen erklärt zumindest teilweise, dass die Risikobewertungen im Mittel durchweg höchstens im unangenehmen Bereich in der unteren Hälfte der Skala lagen. Wenn Menschen nämlich die Möglichkeit gegeben wird, hochautomatisiertes Fahrverhalten so einzustellen, wie es für sie ideal bzw. akzeptabel ist, versuchen sie jedes Risiko zu vermeiden (siehe Zero Risk Theory). Mit dieser Messmethodik ist es also nicht möglich, Interaktionen im riskanten, gefährlichen Bereich der Skala zu untersuchen. Diese Messmethodik wurde jedoch bewusst gewählt, um einen Eindruck zu bekommen, wie die Präferenzen der menschlichen Verkehrsteilnehmer verteilt sind, und diese aus den unterschiedlichen Perspektiven (Mitfahrer, Radfahrer, Fußgänger) zu vergleichen. Entsprechend sind die Messwerte weniger ein Ausdruck von Risiko, sondern eher von Komfort.

Insgesamt betrachtet die Onlinestudie eine dyadische Interaktion zwischen einem hochautomatisierten Fahrzeug und einem schwächeren Verkehrsteilnehmer. Die Ergebnisse können somit auf vergleichbare Fahrsituationen generalisiert werden, jedoch ist völlig unklar, welchen Effekt die gewünschte, defensive Auslegung des hochautomatisierten Fahrverhaltens durch frühes Bremsen im Einmündungsbereich auf die Effizienz des Verkehrssystems im urbanen Raum hat. Eine Generalisierung der Ergebnisse auf ein ganzes urbanes Verkehrssystem ist somit nicht möglich. Dazu sind Verkehrssimulationen ein geeignetes Instrument. Die nächsten Schritte zur Untersuchung des erlebten Risikos aus Mitfahrersicht ist die Validierung der gefundenen Ergebnisse im

Realfahrzeug. Die auf den Ergebnissen der beschriebenen Probandenstudien im Vehicle-in-the-Loop Studie ist im Kapitel 5.3 beschrieben.

5.3 Studie 3: Erlebtes Risiko im VIL (TUBS)

Zur Validierung der Ergebnisse der vorherigen Fahrsimulator- und Onlinestudien wurde eine Realfahrtstudie im Forschungsfahrzeug „Vehicle-in-the-Loop“ auf einem abgesperrten Testgelände, einem stillgelegten Flughafen im Landkreis Peine, durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Realfahrtstudie eingehend berichtet. Anschließend werden diese Ergebnisse mit denen der Fahrsimulatorstudien verglichen und methodenübergreifend kritisch diskutiert.

Für die Fahrsituation „Gerade Hauptstraße“ waren die Forschungsfragen:

- Wie verändert sich das erlebte Risiko und der Fahrkomfort von Mitfahrern in der Interaktion mit einem Fußgänger in Abhängigkeit von verschiedenen Auslegungen der automatisierten Fahrfunktion?
- Wie möchten menschliche Fahrer in der Interaktion mit einem Fußgänger idealerweise gefahren werden?

Für die Fahrsituation „Einmündung“ waren die Forschungsfrage:

- Welchen Bremsbeginn präferieren Mitfahrer im hochautomatisierten Fahrzeug, wenn das Fahrzeug, in dem sie sich befinden, auf eine Einmündung zufährt und einem schwächeren Verkehrsteilnehmer Vorfahrt gewähren muss? Welchen Bremsbeginn finden Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug im Hinblick auf ihr erlebtes Risiko gerade noch akzeptabel?

5.3.1 Methodik

5.3.1.1 Versuchsplan Gerade Hauptstraße

Im Fahrszenario „Gerade Hauptstraße“ wurden zwei Einflussgrößen variiert: (1) Vorhandensein von Gegenverkehr (mit / ohne Gegenverkehr) und der laterale Versatz im eigenen Fahrstreifen (links / ohne / rechts). Der laterale Versatz, den das automatisierte Fahrzeug im eigenen Fahrstreifen fuhr, ist eine Abweichung des Fahrzeugmittelpunkts um 0.5 m von der Fahrstreifenmitte nach links bzw. nach rechts. Alle Variationen der beiden Einflussgrößen wurden vollständig miteinander kombiniert. Alle Probanden erlebten alle sechs Variationen. Um Reihenfolgeeffekte zu vermeiden, wurde die Reihenfolge der Variationen mittels lateinischer Quadrate permutiert.

Gegenüber der Fahrsimulatorstudie (siehe Studie 1) wurden die Probanden in dieser Studie in jeder Versuchsbedingung mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h gefahren und passierten dabei immer eine Fußgängerin, welche sich auf dem Parkstand befand. Diese Versuchsbedingungen wurden ausgewählt, da die Probanden diese in der vorherigen Fahrsimulatorstudie als risikoreich bewertet wurden (siehe Abbildung 36). Der Versuchsplan ist in Tabelle 23 zusammengefasst.

Tabelle 23: Versuchsplan im Fahrscenario „Gerade Hauptstraße“.

Faktor A: Gegenverkehr	Faktor B: Lateraler Versatz im eigenen Fahrstreifen		
	Links	Ohne	Rechts
Ja	1	2	3
Nein	2	4	6

5.3.1.2 Versuchsplan Einmündung

Im Fahrscenario „Einmündung“ wurden zwei Einflussgrößen variiert. Beim Heranfahen an die Einmündung interagierten die Probanden im automatisierten Fahrzeug entweder einem Fußgänger oder einem Radfahrer (Faktor A: Verkehrsteilnehmer). Die Geschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs beim Heranfahen an die Einmündung hatte zwei Ausprägungen: 30 km/h und 50 km/h (Faktor B: Geschwindigkeit). Alle Variationen der beiden Einflussgrößen wurden vollständig miteinander kombiniert. Alle Probanden erlebten alle vier Variationen. Um Reihenfolgeeffekte zu vermeiden, wurde die Reihenfolge der Variationen mittels lateinischer Quadrate permutiert. Der Versuchsplan ist in Tabelle 24 zusammengefasst.

Tabelle 24: Versuchsplan im Fahrscenario „Einmündung“.

Faktor A: Verkehrsteilnehmer	Faktor B: Geschwindigkeit	
	30 km/h	50 km/h
Radfahrer	1	3
Fußgänger	2	4

5.3.1.3 Versuchsaufbau mit dem Forschungsfahrzeug „Vehicle-in-the-Loop“

Das Forschungsfahrzeug „Vehicle-in-the-Loop“ (ViL; Abbildung 59) bildet eine Schnittstelle zwischen einer simulierten Fahrumgebung und der Fahrdynamik, welche von der Fahrdynamik des Forschungsfahrzeugs ausgeht. Während der Fahrt befindet sich der Proband dabei visuell in einer Simulationsumgebung, welche er durch eine Virtual Reality Brille sieht (siehe Abschnitt 5.3.1.4), während er im realen Forschungsfahrzeug sitzt und dessen Fahrdynamik während der Fahrt erlebt. Um diese Fahrdynamik gefahrenlos erleben zu können, ist ein abgesperrtes Testgelände mit einer großen, ebenen und un bebauten Freifläche nötig. Das Testgelände mit der genutzte Freifläche wird in Abschnitt 5.3.1.7 beschrieben.

Im nächsten Abschnitt werden die für die Probandenstudie wichtigen Bestandteile des Fahrzeugs ViL beschrieben. Zudem werden im Folgenden die hardware- und softwareseitigen Anpassungen beschrieben, die für die Studie nötig waren.

Für eine möglichst gefahrenlose Nutzung des Versuchsfahrzeugs wurde ein Sicherheitskonzept umgesetzt (siehe Anhang A).



Abbildung 59: Das Forschungsfahrzeug "Vehicle-in-the-Loop" (ViL) in der Außenansicht (Foto: Institut für Regelungstechnik).

5.3.1.4 Virtual Reality-Brille (VR-Brille)

Die Probanden erlebten die Fahrszenarien in einer virtuellen Welt durch eine Virtual Reality-Brille (VR-Brille). Als Virtual Reality-Brille kam eine Oculus Rift (Development Kit 2, DK2) zum Einsatz. Diese Brille hat ein OLED Display mit 5,7 Zoll, welches eine Gesamtauflösung von 1920 x 1080 Pixel besitzt, was pro Auge einer Auflösung von 960 x 1080 Pixel entspricht. Mit einer HDMI-Verbindung wird das in der Simulation gerenderte Bild an die Virtual Reality-Brille übertragen und somit dem Probanden angezeigt. In Abbildung 60 links ist ein Proband zu sehen, der die Virtual Reality-Brille trägt. In Abbildung 60 rechts ist beispielhaft dargestellt, was ein Proband während der Versuche zu einem bestimmten Zeitpunkt sieht. Diese Bild wird in der Simulation entsprechend der Kopfpose (Position und Orientierung) des Probanden gerendert und an die Brille zur Anzeige gesendet. Damit waren die Probanden während der Versuche visuell von der realen Umgebung getrennt, erfuhren aber auditives und haptisches Empfinden des realen Umfelds (beispielsweise Beschleunigungswerte bei Verzögerungen des Fahrzeugs).



Abbildung 60: Links: Ein Proband mit aufgesetzter VR-Brille. Rechts: Beispielhafte Sicht des Probanden durch die VR-Brille während einer Fahrt in der simulierten Umgebung (Foto: Institut für Regelungstechnik).

Um ein möglichst reales Fahrgefühl zu erzeugen und gleichzeitig die Auftretswahrscheinlichkeit der Reisekrankheit (engl. motion sickness) bei den Probanden zu minimieren, musste die wahrgenommene und vom Gehirn erwartete Bewegung mit dem realen Fahrgefühl übereinstimmen. Daher wurde die Kopfbewegung des Probanden erfasst und in der Simulation abgebildet. Dazu wurde ein Headtracking System auf dem Armaturenbrett vor der Windschutzscheibe installiert (siehe Abbildung 61). Dieses System erfasst die an der VR-Brille befestigten Marker über Infrarot Sensoren und kann somit die Position und Bewegung des Kopfes berechnen und das anzuzeigende Bild aus der Simulation entsprechend rendern und ausgeben.



Abbildung 61: Headtracking System auf dem Armaturenbrett (weiß), welches die Kopfposition und Kopfbewegung des Probanden detektiert, sodass diese bei der Bildgenerierung in der Simulation berücksichtigt werden kann (Foto: Vanessa Stange).

5.3.1.5 Knopf zum Auslösen eines Haltevorgangs

Im Fahrscenario „Einmündung“ hatten die Probanden die Aufgabe, die Bremsung des automatisierten Fahrzeugs mittels Knopfdruck auszulösen (siehe Abschnitt 5.3.1.13). Dazu wurde ein großer Knopf im Cockpit installiert (siehe Abbildung 62). Der Knopf wurde in der simulierten Fahrumgebung nicht abgebildet und war entsprechend unsichtbar, jedoch konnten die Probanden den Knopf aufgrund seiner Größe problemlos „blind“ während der Fahrt in der simulierten Fahrumgebung betätigen. Bei Betätigung des Knopfes verzögerte das Fahrzeug und kam unmittelbar vor der Haltelinie an einem vorher definierten Haltepunkt zum Stehen.



Abbildung 62: Im Cockpit verbauter Knopf, der für die Auslösung des Haltevorgangs aus Fahrscenario „Einmündung“ genutzt wurde (Fotos: Susanne Ernst)

5.3.1.6 Fahrschulpedalerie

Da sich die Probanden während der einzelnen Testfahrten visuell in der simulierten Fahrumgebung befanden, bewegten sich die Probanden in der Realität „blind“ über die Freifläche des abgesperrten Testgeländes. Aus diesem Grund befand sich eine erfahrene Sicherheitsfahrerin, welche die technischen Systeme und das Forschungsfahrzeug ViL kennt, während der gesamten Versuchsdauer auf dem Beifahrersitz. Die Sicherheitsfahrerin überwachte das reale Fahrzeugumfeld sowie die technischen Abläufe und hatte über die verbaute Fahrschulpedalerie jederzeit die Möglichkeit, in das Fahrgeschehen einzugreifen (siehe Abbildung 63). Die Fahrschulpedalerie besitzt einen mechanischen Durchgriff zur Pedalerie auf der Fahrerseite, sodass die Betätigung der Pedalerie auf der Fahrerseite auch aktiv verhindert werden kann. Mittels dieser Sicherheitsvorkehrung sollten sicherheitskritische Situationen, z.B. ein Abkommen von der Fahrbahn, verhindert werden.

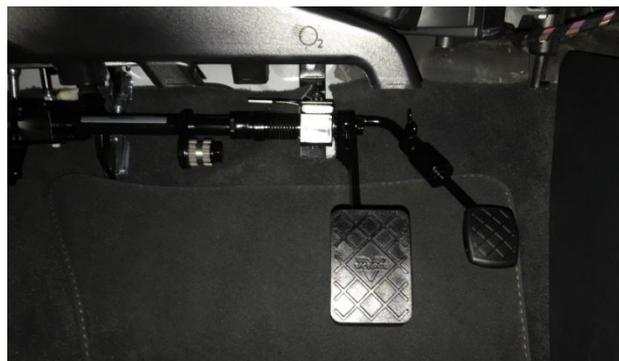


Abbildung 63: Im Fußraum des Beifahrers verbaute Fahrschulpedalerie, über die die Sicherheitsfahrerin in die Fahrzeugführung eingreifen konnte (Foto: Susanne Ernst).

5.3.1.7 Testgelände

Für die Probandenversuche wurde der stillgelegte Flugplatz in Peine-Eddesse angemietet, dessen Rollfeld eine Fläche von 900 m Länge und 30 m Breite aufweist (siehe Abbildung 64; Gelb eingerahmt). Wie in Abbildung 64 unten abgebildet ist, sind die Begrenzungen der Asphaltfläche mit Gras bewachsen, sodass bei Ausbrechen des Fahrzeugs keine Hindernisse zu möglichen Kollisionen führen konnten. Das Gelände war abgesperrt, sodass andere Verkehrsteilnehmer nicht auf das Gelände gelangen konnten.



Abbildung 64: Oben: Versuchsgelände Flugplatz Peine-Eddesse aus der Vogelperspektive (Foto: Google Maps). Die gelb eingerahmte Fläche wurde für die Probandenstudien genutzt. Unten: Blick zu den Gebäuden. Der gelbe Punkt oben in der Abbildung markiert den Standort, der blaue Pfeil die Blickrichtung. (Foto: Susanne Ernst).

5.3.1.8 Anpassungen der Software

Neben den beschriebenen hardwareseitigen Anpassungen und der Implementierung der für die Probandenversuche relevanten und zu variierenden Parametern (siehe Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) wurde das im Forschungsfahrzeug „ViL“ genutzte Software Framework und die Simulationsumgebung auf die Probandenstudie vorbereitet. Die Kopplung von Software Framework (blau), welche die automatisierte Fahrfunktion realisiert, und der Simulationsumgebung (grün), die die virtuelle Welt für den Probanden aufbaut und über die Virtual Reality-Brille visualisiert, ist in Abbildung 65 dargestellt. Alle Bestandteile und Module des Software Frameworks und der Simulationsumgebung laufen auf verschiedenen Rechnern in ViL und werden zur Ansteuerung des Fahrzeugs genutzt. Außerdem werden die aus der Ansteuerung resultierenden Fahrzeugbewegungen wiederum in der Simulationsumgebung abgebildet.

Dieser Zusammenhang und die in der Probandenstudie genutzten Tools werden im Folgenden näher beschrieben. Anschließend wird auf die Anpassungen des Software Frameworks und der Simulationsumgebung während der Umsetzung der Probandenstudie eingegangen.

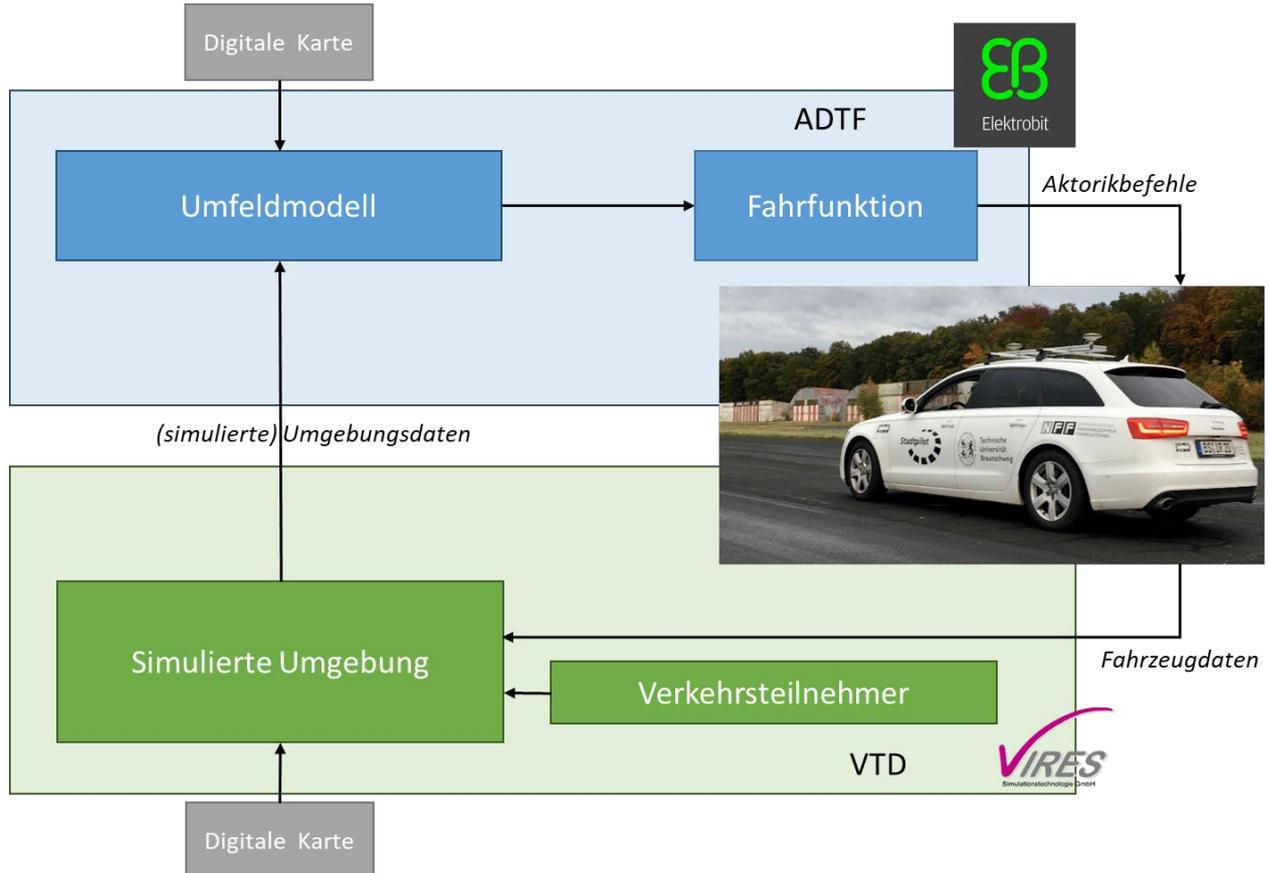


Abbildung 65: Kopplung des Software Frameworks (ADTF) und der Simulationsumgebung (VTD) auf ViL für die Probandenstudie. (Foto: Jan Richelmann)

5.3.1.9 Simulationsumgebung

Zur Erstellung der virtuellen Simulationsumgebung, welche die Probanden während der Versuchsfahrten sahen, wurde die Simulationssoftware VTD 1.4 (Virtual Test Drive, Vires Simulationstechnologie GmbH, <https://vires.mscsoftware.com/>) genutzt. Für die Erstellung des virtuellen Umfelds wird eine digitale Karte, eine 3D Modellierung der Umgebung, das Ego-Fahrzeug sowie andere umgebende Verkehrsteilnehmer benötigt.

Die digitalen Karten wurden im Road Network Editor (ROD) im OpenDRIVE Format erstellt und bildeten das Straßennetz ab. In Abbildung 66 ist links beispielhaft eine Einmündung zu sehen, welche im ROD erzeugt wurde. Die verschiedenen Farben deuten dabei auf unterschiedlichen Elementtypen der Karte hin (Fahrstreifen, Bordstein, Bürgersteig, Radweg etc.). Im ROD erfolgte zusätzlich die 3D Modellierung der Umwelt, um dem Probanden ein möglichst realistisches Bild der virtuellen Welt zu geben. Dabei werden umliegende Gebäude, Straßenschilder und Begrünung an die Ränder der Straßen gesetzt (Abbildung 66 rechts).

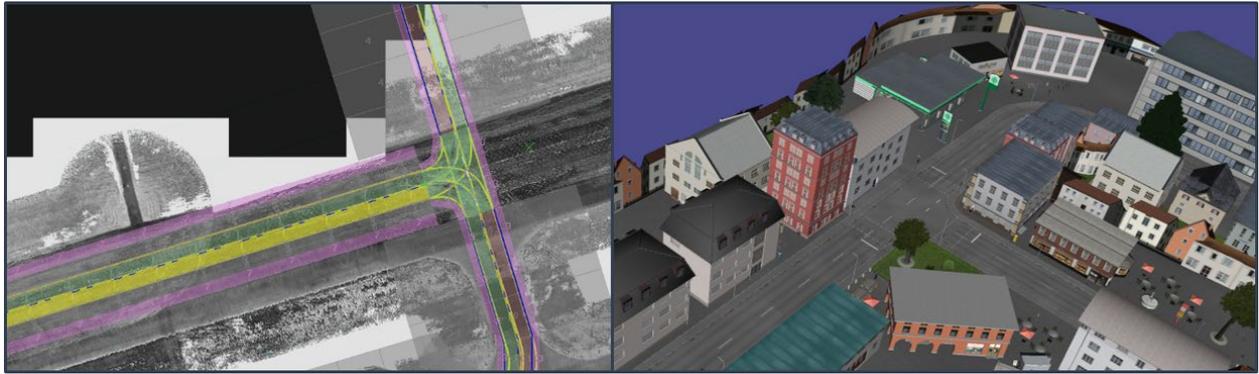


Abbildung 66: Erstellung einer digitalen Karte (links) und einer 3D modellierten Welt für VTD im ROD (Road Network Editor) (rechts).

Um das Szenario zu vervollständigen, wurden das Ego-Fahrzeug und andere Verkehrsteilnehmer an den vorgesehenen Stellen platziert und deren Verhaltensweisen definiert. Dazu wird der Scenario Editor genutzt, der ebenfalls zur Simulationssoftware VTD gehört. Das Forschungsfahrzeug „ViL“ entspricht der Repräsentation des Ego-Fahrzeugs in VTD.

In Abbildung 67 links ist die im ROD erstellte Karte zu sehen, auf der sich das Ego-Fahrzeug (blau) befindet. Zusätzlich wurden weitere Verkehrsteilnehmer (rot) platziert. Die Verkehrsteilnehmer haben unterschiedliche Klassen (Fahrzeug, Fahrradfahrer, Fußgänger) und damit unterschiedliche Bewegungsmodelle.

Darüber hinaus lassen sich die Verkehrsteilnehmer optisch verändern um eine (simulierte) Umgebung möglichst vielfältig und ansprechend zu gestalten. Dazu gehört das Geschlecht oder der Kleidungsstil eines Fußgängers oder das Modell und Farbe eines Fahrzeugs. Somit konnte das Fahrscenario an die optische Gestaltung der Probandenstudien des IV angepasst werden. Ein Beispiel für die optische Definition von Verkehrsteilnehmern ist in Abbildung 67 (rechts) gegeben.

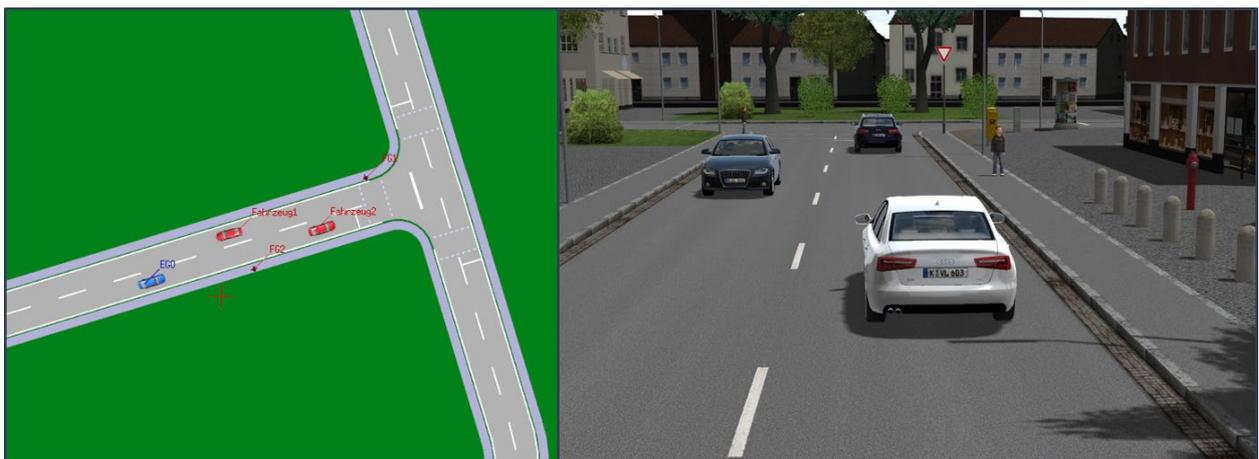


Abbildung 67: Erstellung eines Szenarios im Scenario Editor in VTD (links) und die entsprechende 3D modellierte Welt (rechts).

Die umliegenden Verkehrsteilnehmer können Aktionen ausführen, wie zum Beispiel einem Pfad mit einer definierten Geschwindigkeit folgen, ihre Geschwindigkeit ändern und sind abhängig vom gewählten Bewegungsmodell. Die Aktionen beginnen entweder

orange) miteinander verbunden sind. Diese Konnektoren treten immer auf, sobald Fahrstreifen zusammenlaufen, sich trennen oder (wie in diesem Beispiel) eine Kreuzung beginnt bzw. endet. Die Fahrstreifen werden begrenzt durch die Fahrstreifenbegrenzungen (weiß). Andere, um das Ego-Fahrzeug (türkis) herum befindlichen Verkehrsteilnehmer können Fahrstreifensegmenten zugeordnet werden (dunkelgrau) oder nicht (hellgrau). Zudem liegt unter anderem die Information zur Klasse des Verkehrsteilnehmers (Fahrzeug, Fußgänger etc.) im Umfeldmodell vor.

Um den Zusammenhang von VTD und ADTF an diesem Beispiel zusätzlich zu verdeutlichen, wurde das Szenario in Abbildung 67 für die Darstellung des Umfeldmodells in Abbildung 68 verwendet.

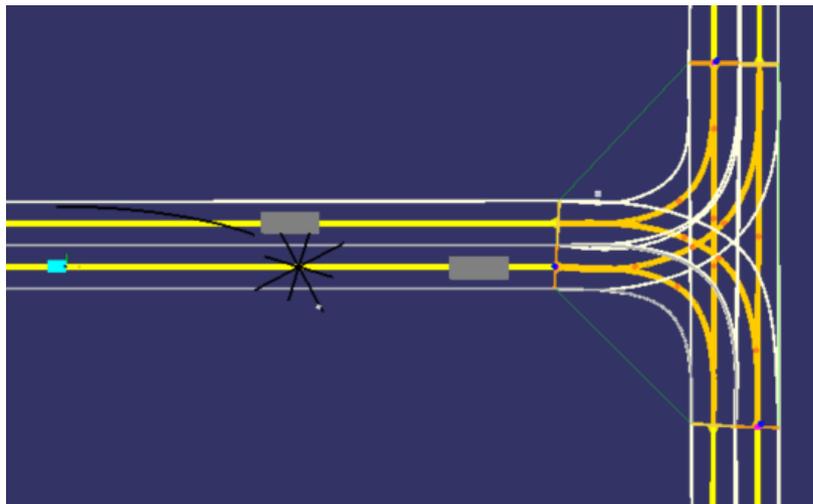


Abbildung 69: Errechnete Informationen der Fahrfunktion in ADTF auf Basis des Umfeldmodells.

Auf Basis des Umfeldmodells errechnet die Fahrfunktion eine Zielposition und eine Trajektorie. Dies ist in Abbildung 69 anhand des Umfeldmodells dargestellt. Die Zielposition ist die Position, zu der das Fahrzeug die nächste Trajektorie planen soll (schwarzer Stern). Die Trajektorie verläuft entlang der Fahrstreifenmitte und weist einen Geschwindigkeitsverlauf auf (schwarze Linie oberhalb des Ego-Fahrzeugs). In diesem Beispiel plant das Fahrzeug, hinter dem stehenden Verkehrsteilnehmer zum Stehen zu kommen, sodass das Geschwindigkeitsprofil zur Zielposition abfällt.

Die von der Fahrfunktion berechnete Trajektorie und die daraus resultierenden Aktorikbefehle setzen das Fahrzeug in der Realität in Bewegung. Diese Bewegung wird dann wiederum in VTD umgesetzt und dem Probanden als Bewegung in der simulierten Umgebung angezeigt.

Im Folgenden werden die konkreten Anpassungen in ADTF, welche über die Implementierung der zu variierenden Parameter hinausgeht, und der Aufbau und die Implementierung der Szenarien detaillierter erklärt.

5.3.1.11 Aufbau der digitalen Karten

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, enthalten das Umfeldmodell in ADTF und die simulierte Umgebung in VTD die gleichen Informationen. Da diese beiden Bestandteile korrespondierende Repräsentationen eines Szenarios sind, benötigt das Umfeldmodell in ADTF die gleichen Karteninformationen, wie das simulierte Umfeld in VTD. Allerdings ist eine direkte Übertragung der Informationen, wie beispielsweise im Falle der Verkehrsteilnehmer, nicht möglich. Die unterschiedlichen Anforderungen von ADTF und VTD an die Kartenformate machen eine gesonderte Erstellung der digitalen Karten nötig. Da aber die geplante Trajektorie des Fahrzeugs mit einer Fahrt entlang eines visualisierten Fahrstreifens übereinstimmen musste, wurden identische digitale Karten in ADTF und VTD benötigt. Um zu gewährleisten, dass die digitalen Karten in VTD und ADTF übereinstimmen, wurde dieselbe Datenbasis verwendet. Damit wurde sichergestellt, dass die von der Fahrfunktion geplanten Trajektorien für den Probanden sinnvoll in die simulierte Umgebung passte und das Fahrzeug sich in VTD immer auf den entsprechenden Fahrstreifen bewegte. In Abbildung 70 ist das grundlegende Vorgehen dargestellt. Links ist die Datenbasis zu sehen, die aus georeferenzierten Luftbildern des Testgeländes in Eddesse bestand. Auf diesen Luftbildern wurde zunächst das Straßennetz gezeichnet, welches für die Probandenstudie genutzt werden sollte (gelb). Dieses Straßennetz wurde dann einerseits für VTD im ROD verwendet und daraus die Karte für den Szenario Editor erstellt (rechts unten). Andererseits wurde die digitale Karte für ADTF mit einem am Institut für Regelungstechnik für diesen Zweck programmierten Tool erzeugt (rechts oben).

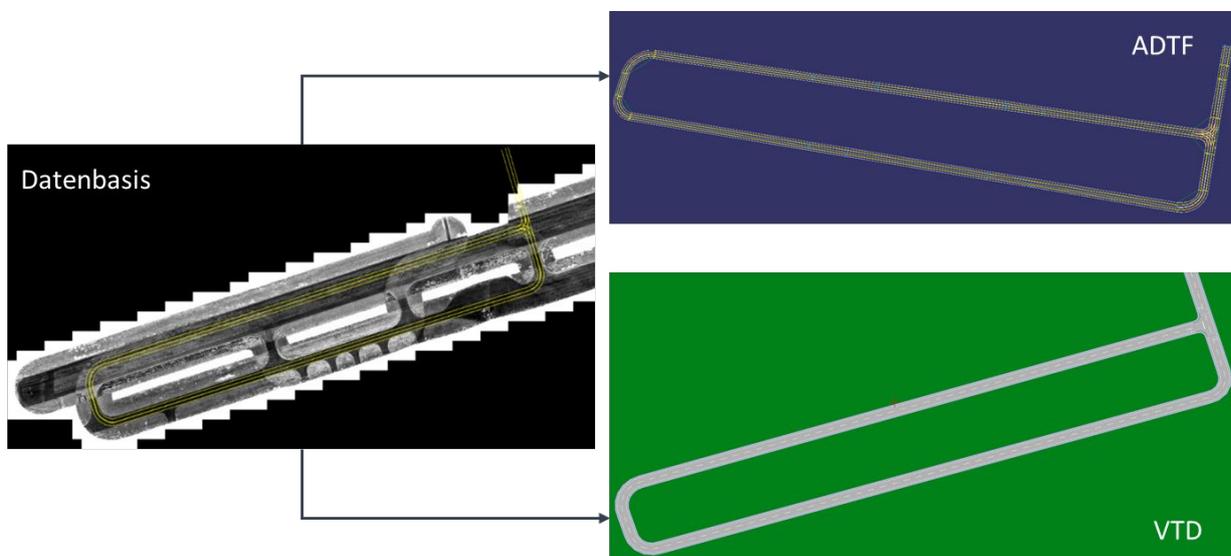


Abbildung 70: Erstellung identischer digitaler Karten für ADTF und VTD.

Für das Einmündungsszenario als auch für das Fahrscenario „Gerade Hauptstraße“ konnte dieselbe Karte verwendet werden, da die erstellte Karte alle nötigen Straßentopologien für die Studie aufwies. Allerdings wurden die Szenarien in unterschiedlichen Bereichen der Karte durchgeführt, welche anhand der Karte im Szenario Editor in Abbildung 71 dargestellt sind.

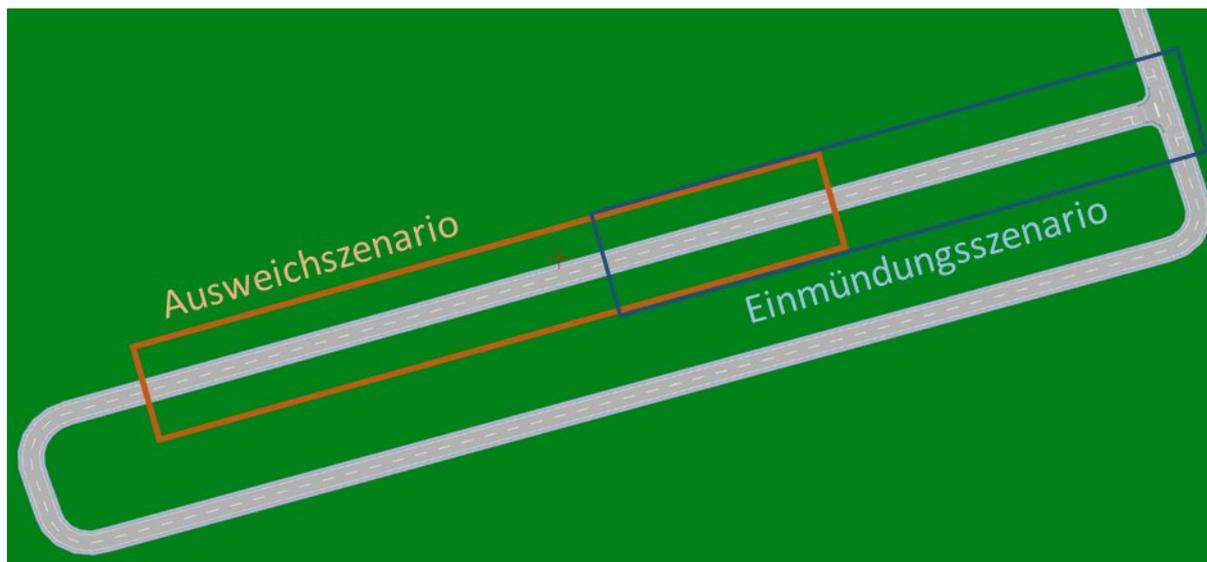


Abbildung 71: Bereiche der digitalen Karte, in denen das Fahrscenario „Gerade Hauptstraße“ und das Einmündungsszenario durchgeführt wurden.

5.3.1.12 Aufbau und Implementierung der Szenarien

Auf Basis der vorher beschriebenen digitalen Karte wurden im Anschluss das Einmündungs- und das Fahrscenario „Gerade Hauptstraße“ erstellt. Die 3D Modellierung der Szenarien war dabei unterschiedlich, um dem Probanden Abwechslung in der virtuellen Umgebung zu bieten und die Szenarien visuell stärker voneinander abzugrenzen.

„Gerade Hauptstraße“:

Das Fahrscenario „Gerade Hauptstraße“ wurde im gekennzeichneten Bereich aus Abbildung 71 durchgeführt. Ungefähr in der Mitte des Bereichs befanden sich Parkbuchten, auf denen ein Fahrzeug parkte und einen dahinter laufenden Fußgänger verdeckte. Bei einigen Variationen des Szenarios befand sich zusätzlich ein entgegenkommendes Fahrzeug auf dem Nachbarfahrstreifen. Die Variationen des Szenarios sind in Tabelle 23 aufgelistet.

Der Fußgänger und das entgegenkommende Fahrzeug waren dynamische Elemente des Szenarios. So mussten diesen Verkehrsteilnehmer Aktionen in Abhängigkeit des Ego-Fahrzeugs zugewiesen werden. Der Fußgänger lief, ausgelöst von der Position des Ego-Fahrzeugs, in der Parkbucht in Richtung der Straße bzw. des parkenden Fahrzeugs. Ebenso startete das entgegenkommende Fahrzeug auf dem Nachbarfahrstreifen, sobald sich das Ego-Fahrzeug an einer bestimmten Position befand, und beschleunigte auf 50 km/h. In Abbildung 72: Aufbau des ist der Aufbau des Szenarios im Scenario Editor dargestellt.

Die gelben Rauten waren die Auslösungspunkte für die Aktionen des Fußgängers (FG) bzw. des entgegenkommenden Fahrzeugs (e_Fahrzeug). Sobald sich das Ego-Fahrzeug über diese Positionen bewegte, begann der Fußgänger zu laufen bzw. das entgegenkommende Fahrzeug dem Fahrstreifen zu folgen. Das parkende Fahrzeug (p_Fahrzeug) ist ebenfalls abgebildet.

Da der Fußgänger keinem vordefinierten Fahrstreifen folgen kann wie das entgegenkommende Fahrzeug, musste für diesen Verkehrsteilnehmer ein Pfad definiert

werden. Dieser definierte Pfad ist im unteren Teil der Abbildung 72 zu sehen, welcher der Fußgänger nach Auslösung durch das Ego-Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 3 km/h ausführte.

Die Abstände der Elemente waren in der Realität deutlich größer, zu Visualisierungszwecken wurde die Darstellung angepasst.

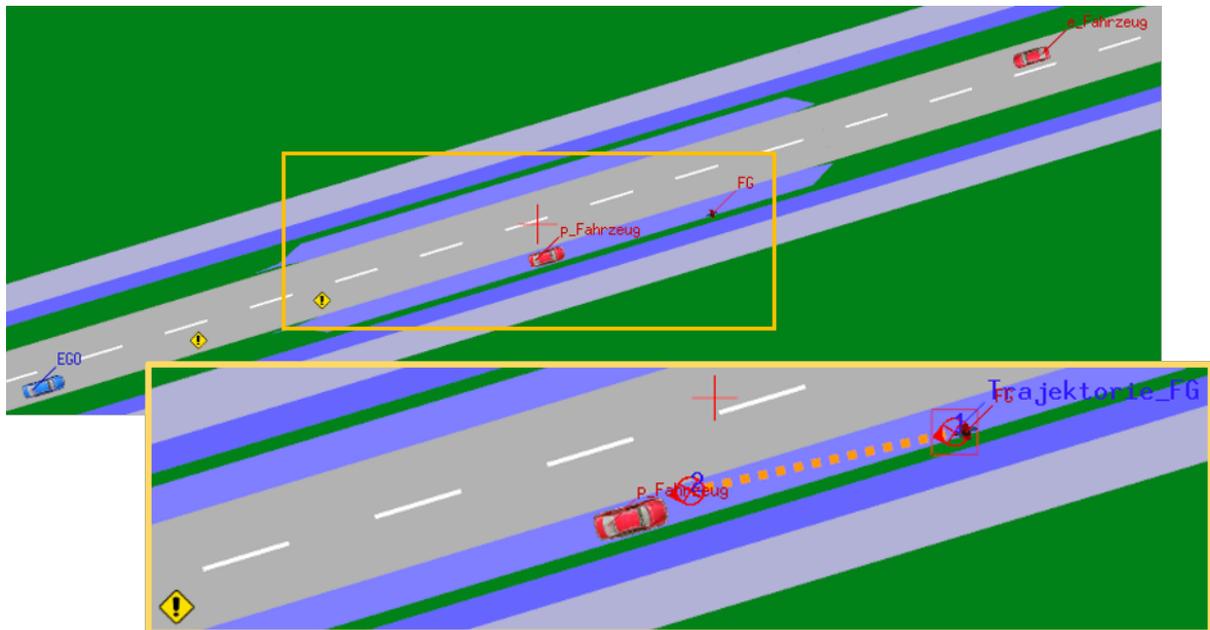


Abbildung 72: Aufbau des Szenarios „Gerade Hauptstraße“

In diesem Fahrscenario hatten die Probanden eine passive Rolle und griffen nicht in die Fahraufgabe ein. Das Ego-Fahrzeug startete am Anfang der Gerade, sodass die Zielgeschwindigkeit von 50 km/h vor den Parkständen auf der rechten Seite erreicht war. Im Falle der Variationen mit lateralem Versatz nach links bzw. rechts baute das Ego-Fahrzeug ungefähr 30 m vor dem parkenden Fahrzeug einen lateralen Versatz im eigenen Fahrstreifen von 0,5 m zur Fahrstreifenmitte auf. Nachdem das parkende Fahrzeug und der dahinter befindliche Fußgänger passiert worden sind, verringerte das Ego-Fahrzeug den Abstand zu Fahrstreifenmitte wieder und zentrierte sich im Fahrstreifen. In Abbildung 73: Links: Distanzen zur Fahrstreifenmitte und den Fahrstreifenbegrenzungen beim lateralen Versatz nach links. Rechts: Geschwindigkeiten der dynamischen Verkehrsteilnehmer. links ist der Ausweichvorgang und der Aufbau und Abbau des lateralen Versatzes zur Fahrstreifenmitte anhand des Szenarios „links Ausweichen“ dargestellt. Während sich der Versatz zur Fahrstreifenmitte auf 0,5 m aufbaut, verringert sich der Abstand zur linken Fahrstreifenbegrenzung und erhöht sich entsprechend zur rechten Begrenzung. Die Schwingungen vor und nach dem Fahren des lateralen Versatzes resultieren aus dem Verhalten des realen Fahrzeugs, welches beispielsweise durch die Trägheit eines Fahrzeugs oder die Latenzen eines Reglers für die Ansteuerung der Aktorik, beeinflusst wird. Die Schwankungen lagen im Bereich von ca. 0,1 m und waren für den Probanden nicht als unruhiges Verhalten spürbar.

Abbildung 73 rechts zeigt zudem die bereits vorher beschriebenen Geschwindigkeiten der dynamischen Verkehrsteilnehmer. Das Ego-Fahrzeug (gelb) beschleunigt auf 50 km/h (13,8 m/s), sobald es den ersten Auslöschungspunkt erreicht, startet das entgegenkommende Fahrzeug (blau) und erreicht nach kurzer Zeit ebenfalls 50 km/h.

Der Fußgänger startet mit dem zweiten Auslösungspunkt etwas später und erreicht eine Geschwindigkeit von 3 km/h (0.84 m/s). Während des Ausweichvorgangs sind alle relevanten Verkehrsteilnehmer in Bewegung.

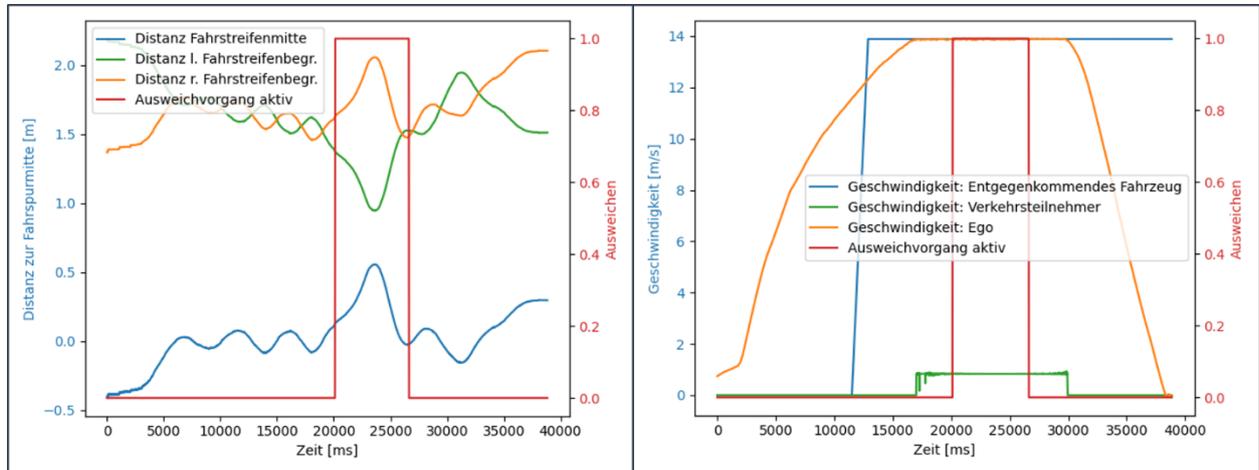


Abbildung 73: Links: Distanzen zur Fahrstreifenmitte und den Fahrstreifenbegrenzungen beim lateralen Versatz nach links. Rechts: Geschwindigkeiten der dynamischen Verkehrsteilnehmer.

Für die Positionierung der Auslösungspunkte war wichtig, dass das Ego-Fahrzeug beim maximalen Versatz im Fahrstreifen die minimale Distanz zu Fußgänger und entgegenkommendem Fahrzeug aufwies. Dies ist in Abbildung 74 dargestellt. In der Mitte des Ausweichvorgangs bei maximalem Versatz sind die Distanzen minimal. Die minimale Distanz zum parkenden Fahrzeug wird früher erreicht, da sich dieses vor dem Fußgänger befand und damit früher passiert wurde.

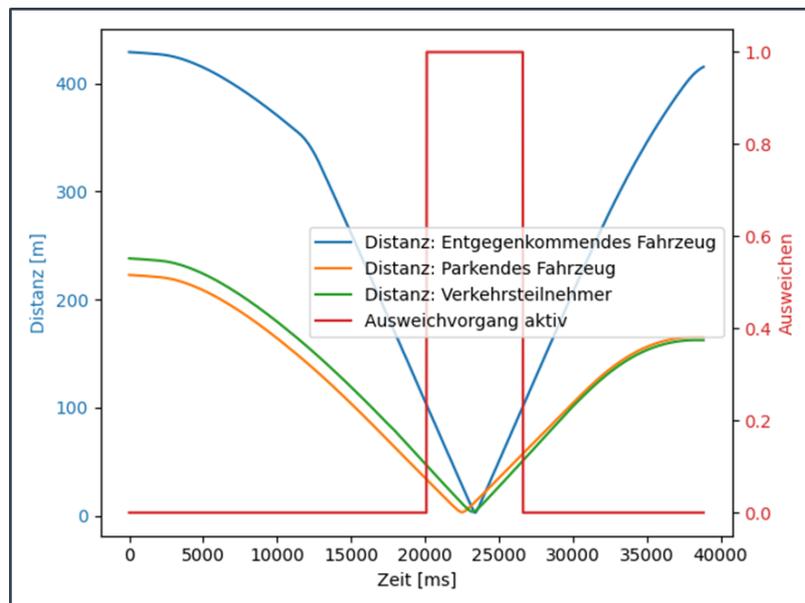


Abbildung 74: Distanzen zu den anderen Verkehrsteilnehmern beim lateralen Versatz nach links.

Abbildung 75 zeigt den Aufbau des Fahr Szenarios aus der Perspektive des Probanden (Ego-Fahrer). Bei dem Szenario wurde für den Fußgänger eine Frau verwendet, um dem Szenario in der Fahr Simulatorstudie des IVs zu entsprechen.



Abbildung 75: Perspektive des Probanden im Szenario „Gerade Hauptstraße“.

„Einmündungsszenario“:

Das Einmündungsszenario wird im blau gekennzeichneten Bereich durchgeführt (siehe Abbildung 71). Die Einmündung war in diesem Szenario durch wenig Bebauung freigestellt, sodass eine freie Sicht auf den kreuzenden Fußgänger bzw. Fahrradfahrer möglich war. Zudem war die Einmündung mit einem „Vorfahrt achten“ Schild versehen, um dem Probanden auf die zu gewährende Vorfahrt hinzuweisen. Dies wurde in der Einführung des Szenarios zusätzlich erläutert. Die Variationen des Einmündungsszenarios betrafen einerseits die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs und andererseits die Art des vulnerablen Verkehrsteilnehmers. Die Variationen dieses Szenarios sind in Tabelle 24 aufgelistet.

In diesem Szenario waren, je nach Variation des Szenarios, ein Fußgänger oder Fahrradfahrer beteiligt, welche von links nach rechts die Einmündung passierten. Das Ego-Fahrzeug musste dabei diesen Verkehrsteilnehmern Vorfahrt gewähren. Das Ziel war es daher, vor der Kreuzung an einem vorher definierten Haltepunkt zum Stehen zu kommen, da es bei Nichtbeachtung der Vorfahrtregel zu einer Kollision mit dem vulnerablen Verkehrsteilnehmer gekommen wäre.

Wie auch im vorher beschriebenen Szenario „Gerade Hauptstraße“, wurden die Aktion des Fußgängers bzw. Fahrradfahrers durch die Position des Ego-Fahrzeugs ausgelöst. Bei der Definition der Startposition der Verkehrsteilnehmer und dem Auslösungspunkt der entsprechenden Aktion war wichtig, dass für den Probanden die Notwendigkeit eines Haltemanövers deutlich wurde. Der Aufbau des Einmündungsszenarios ist qualitativ in

Abbildung 76 im Szenario Editor dargestellt. Wie auch in Abbildung 72, waren die Abstände in der Realität größer.

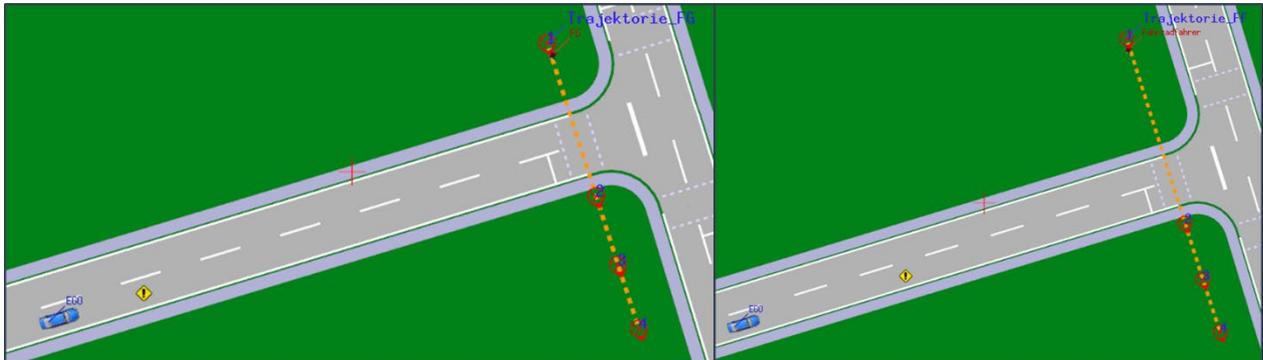


Abbildung 76: Aufbau des Einmündungsszenarios. Links: Variation mit Fußgänger. Rechts: Variation mit Fahrradfahrer.

Die definierten Pfade, welche die Verkehrsteilnehmer während des Szenarios zurücklegen, sind gelb markiert. Der Fahrradfahrer startet mit einer größeren Distanz zur Kreuzung als der Fußgänger. Dies liegt an der höheren Geschwindigkeit (3.33 m/s) im Vergleich zum Fußgänger (0.84m/s), sodass der Fahrradfahrer weniger Zeit benötigt die Kreuzung zu erreichen. Zusätzlich wurde dieser Effekt durch die Verschiebung des Auslösungspunktes für den Start des Fußgängers Richtung Kreuzung berücksichtigt. Somit erreicht das Ego-Fahrzeug den Auslösungspunkt des Fußgängers früher als den Auslösungspunkt des Fahrradfahrers. Des Weiteren nahm die Egogeschwindigkeit Einfluss auf die Positionierung des Auslösungspunktes. Denn neben der Variation des vulnerablen Verkehrsteilnehmers wurde auch die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs variiert (30 km/h und 50 km/h). Bei einer höheren Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs von 50 km/h wurde der Auslösungspunkt später erreicht als bei 30 km/h.

Bei den Abständen von „vulnerablen Verkehrsteilnehmern zu Kreuzung“ und „Auslösungspunkten zu Kreuzung“ wurde sich dabei an den Richtwerten der Fahrstudie des IVs orientiert, um die vorangegangenen Versuche im Fahrstudie möglichst genau im ViL abzubilden.

Im Einmündungsszenario sollten die Probanden aktiv in das Fahrgeschehen eingreifen. Die Probanden sollten dabei entscheiden, wann sie den Verzögerungsvorgang zum vordefinierten Haltepunkt auslösen um dem vulnerablen Verkehrsteilnehmer Vorfahrt zu gewähren. Der Verzögerungsvorgang wurde mit Betätigen des in Abschnitt 5.3.1.5 beschriebenen Knopfes im Cockpit des ViL ausgelöst. Das Haltemanöver sollte dabei jeweils einmal zum idealen Zeitpunkt und einmal zum letzten, akzeptierten Zeitpunkt ausgelöst werden.

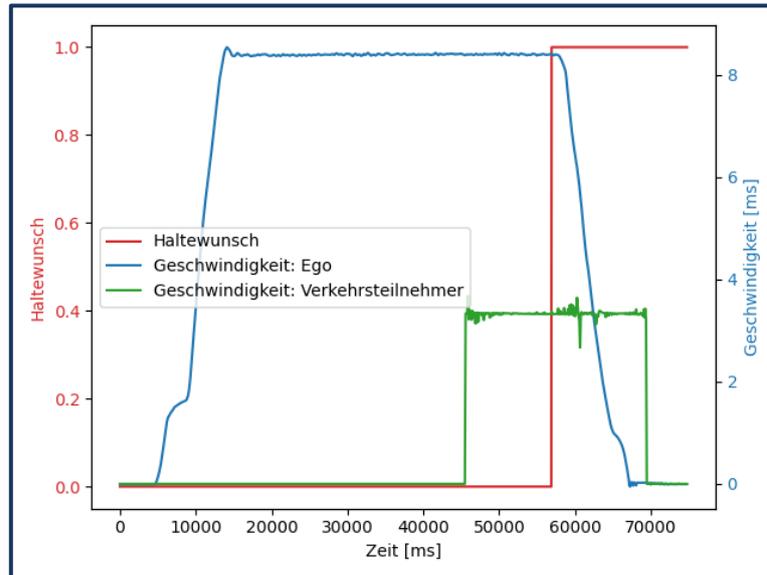


Abbildung 77: Beispielhafte Daten für das Einmündungsszenario bei Ego-Geschwindigkeit = 30 km/h und einem kreuzenden Fahrradfahrer. Der Zeitpunkt des Haltewunsches ist in Rot dargestellt. Der Geschwindigkeitsverlauf des Ego-Fahrzeugs (blau) und des Fahrradfahrers (grün) sind ebenfalls abgebildet.

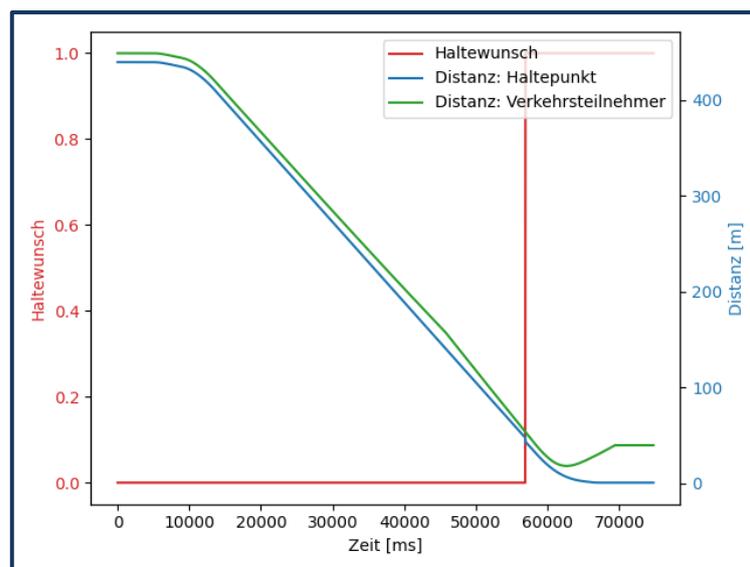


Abbildung 78: Beispielhafte Daten für das Einmündungsszenario bei Ego-Geschwindigkeit = 30 km/h und einem kreuzenden Fahrradfahrer. Der Zeitpunkt des Haltewunsches ist in Rot, die Distanz zum Haltepunkt in Blau und die Distanz zum Fahrradfahrer in Grün.

In Abbildung 77 und in Abbildung 78 sind die Daten des Einmündungsszenario bei einer Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs bei 30 km/h und einem kreuzenden Fahrradfahrer dargestellt. Verzögert wurde hierbei zum für den Probanden idealen Zeitpunkt.

In der oberen Grafik sind die Geschwindigkeiten der beteiligten Verkehrsteilnehmer und der Zeitpunkt des Haltewunsches dargestellt. Das Ego-Fahrzeug beschleunigt zu Anfang auf 8,3 m/s (30 km/h). Der Fahrradfahrer startet, sobald das Ego-Fahrzeug den Auslöschungspunkt passiert. Wichtig bei diesem Szenario war, dass das Ego-Fahrzeug den Auslöschungspunkt bei einer Geschwindigkeit von 8,3 m/s erreicht, da sonst die relativen

Positionen des Ego-Fahrzeugs und des vulnerablen Verkehrsteilnehmers an der Kreuzung nicht zu einer potentiell gefährlichen Situation geführt hätten. Nach Betätigung des Knopfes verzögert das Fahrzeug und kommt am Haltepunkt zum Stehen. Daher verringert sich die Distanz am Ende in der unteren Grafik auf 0. Der Fahrradfahrer legt nach dem Haltemanöver noch etwas Strecke zurück, wodurch sich die Distanz zum Fahrradfahrer im Anschluss wieder etwas erhöht, bis auch der Fahrradfahrer zum Stehen kommt und die Distanz konstant bleibt.

Abbildung 79 zeigt den Aufbau des Fahr Szenarios aus der Perspektive des Probanden (Ego-Fahrer). Für das Szenario wurde für den Fußgänger bzw. den Fahrradfahrer auch hier eine Frau verwendet, um dem Szenario in der Fahr simulatorstudie des IVs zu entsprechen.



Abbildung 79: Ego-Perspektive beim Heranfahren an die Einmündung. Der Fahrradfahrer befindet sich auf dem Bürgersteig auf der linken Seite der Einmündung.

5.3.1.13 Aufgabe

Im Fahr Szenario „Gerade Hauptstraße“ bestand die Aufgabe der Probanden darin, die Fahrumgebung während der automatisierten Fahrt zu beobachten.

Im Fahr Szenario „Einmündung“ bestand die Aufgabe der Probanden darin, den Knopf zu dem Zeitpunkt zu drücken (siehe Abbildung 62), zu dem das automatisierte Fahrzeug idealerweise abbremsen soll, um vor der Einmündung zum Stehen zu kommen. Als Indikator für das Grenzkrisiko sollten Probanden mittels Knopfdruck den letzten akzeptablen Zeitpunkt bestimmen, zu dem das automatisierte Fahrzeug abbremsen soll, um an der Haltelinie zum Stehen zu kommen.

In beiden Fahr Szenarien bewerteten die Probanden ihr Komfort- und Risikoerleben im Anschluss an jede Einzelfahrt, wie im nächsten Abschnitt beschrieben.

5.3.1.14 Subjektive Messwerte: Fragebogendaten

Nach jeder Fahrt wurden die Probanden nach ihrem erlebten Risiko und ihrem Komforterleben im der vorgegangenen Fahrsituation befragt. Die subjektiven Messwerte der Fragebogenbefragung sind in Tabelle 25 zusammengefasst.

Tabelle 25: Subjektive Messwerte der Fragebogenbefragung.

Dimension	Beschreibung
Erlebtes Risiko	Item [1 (harmlos) ... 8 (Situation nicht akzeptabel)] Risikoskala
Vertrauen in die Automation	Item [1 (trifft überhaupt nicht zu) ... 5 (trifft voll und ganz zu)] "Ich habe dem automatisierten System in der vorangegangenen Situation vertraut."
Nachvollziehbarkeit	Item [1 (trifft überhaupt nicht zu) ... 5 (trifft voll und ganz zu)] "Das Fahrverhalten des automatisierten Fahrzeugs in der vorangegangenen Situation war für mich nachvollziehbar."
Selbst fahren	Item [1 (trifft überhaupt nicht zu) ... 5 (trifft voll und ganz zu)] "In der vorangegangenen Situation wäre ich lieber selbst gefahren."
Kontrollverlust	Item [1 (trifft überhaupt nicht zu) ... 5 (trifft voll und ganz zu)] "Ich fühlte mich dem automatisierten Fahrzeug in der vorangegangenen Situation ausgeliefert."

5.3.1.15 Objektive Messwerte: Fahrdaten

Als Indikatoren für die Bremsreaktion des automatisierten Fahrzeugs wurden im Fahrszenario Einmündung die Distanz des automatisierten Fahrzeugs zur Haltelinie beim idealen Bremszeitpunkt und beim letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt gemessen.

5.3.1.16 Durchführung

Nach der Begrüßung durch die Versuchsleiterin wurden die Probanden mit der Zielsetzung und dem Ablauf der Studie sowie mit der Funktionsweise und den Sicherheitssystemen im Realfahrzeug vertraut gemacht. Die Probanden wurden darüber informiert, dass sie die Teilnahme an der Studie jederzeit und ohne Nachteile widerrufen können.

Im Anschluss gaben die Probanden ihr informiertes Einverständnis zur Aufzeichnung und wissenschaftliche Nutzung der Fahr- und Fragebogendaten. Anschließend erfolgte eine Trainingsfahrt, indem die Probanden entweder zuerst das Fahrszenario „Einmündung“ oder „Gerade Hauptstraße“ erlebten.

Nach jeder Einfahrt nahmen die Probanden die VR Brille ab und bewerteten ihr Komfort- und Risikoerleben in der vorangegangenen Fahrt. Anschließend fuhren die Probanden manuell zum Startpunkt zurück.

Die weiteren Versuchsfahrten erfolgten gemäß dem experimentellen Versuchsplan in einer randomisierten Reihenfolge. Die Hälfte der Probanden erlebte zuerst das Fahrszenario „Einmündung“ während die andere Hälfte zunächst das Fahrszenario „Gerade Hauptstraße“ erlebte. Nach Abschluss der Versuchsfahrten in beiden Fahrszenarien beantworteten die Probanden einen soziodemographischen Fragebogen,

welcher neben Fragen zur Soziodemographie auch die Themenbereiche Mobilitätsverhalten, Nutzung von Fahrerassistenzsystemen, Technikaffinität sowie Fragen zum Kenntnisstand hinsichtlich Fahrzeugautomation umfasste. Jede Testung dauerte inklusive der Einweisung in das Forschungsfahrzeug und aller Fragebögen circa 2 Stunden.

5.3.1.17 Stichprobe

An der Realfahrtstudie nahmen 10 Probanden (1 weiblich) im Alter von 24 bis 35 Jahren ($M = 27.4$ Jahre; $SD = 3.4$ Jahre) teil. Im Durchschnitt besaßen die Probanden ihren Führerschein seit 10.5 Jahren ($SD = 3.5$ Jahre) und 60 % fuhren mindestens mehrmals in der Woche selbst Auto. Die Technikaffinität der Probanden lag bei $M = 5.1$ ($SD = 0.5$) auf einer 6-stufigen Skala (ATI Skala; Franke et al., 2019). 9 Probanden gaben an, Erfahrungen mit Fahrerassistenzsystemen zu haben.

Bei der Frage, ob die Vorstellung von einem automatisierten Fahrzeug gefahren zu werden, unangenehm ist, gaben alle 10 Probanden an, dass sie die Vorstellung eher nicht (6) oder überhaupt nicht unangenehm (4) finden. Analog dazu gab die große Mehrheit von 9 Probanden an, dass es für sie eher nicht oder überhaupt nicht schwierig wäre, die Kontrolle über die Fahraufgabe an ein automatisiertes Fahrzeug abzugeben.

Den eigenen Kenntnisstand hinsichtlich des Themas Automation schätzten die Probanden 4 Probanden ihren Kenntnisstand als gut ein und 5 Probanden als sehr gut. Nur ein Proband schätzte den eigenen Kenntnisstand als „mittel“ ein.

Die große Mehrheit der Probanden hatte bereits Erfahrung im Fahrsimulator gesammelt. 6 Probanden waren vor der Studie bereits einmal gefahren, und 3 Probanden mehr als einmal. 4 Probanden hatten bislang keine Erfahrung im Fahrsimulator. Die Hälfte der Probanden gab an, bereits Erfahrungen in der Arbeit an Versuchsträgern zu haben, wobei keiner der Probanden zuvor an einer Realfahrtstudie teilgenommen hatte.

Die Studie wurde auf dem stillgelegten Flugplatz in Peine-Edesse im Zeitraum von Februar bis März 2021 durchgeführt. Die Voraussetzung für die Teilnahme an der Studie war ein Führerschein Klasse B. Probanden, welche eine Sehhilfe benötigen, trugen diese während der Fahrt im Realfahrzeug. Weiterhin wurden Studieninteressierte mit relevanten Vorerkrankungen in Bezug auf Covid-19 von der Teilnahme ausgeschlossen.

5.3.1.18 Sicherheit der Probanden (Covid-19 Maßnahmen)

Um die Sicherheit der Versuchsleiterin / Sicherheitsfahrerin und der Probanden gewährleisten zu können, wurde ein Hygienekonzept einwickelt (siehe Anhang A). Während der gesamten Studiendauer auf dem Testgelände trugen sowohl die Versuchsleiterin, als auch die Probanden eine Mund-Nase-Bedeckung mit FFP-2 Zertifizierung. Die Sicherheitsfahrerin übernahm in der Probandenstudie auch die Aufgabe der Versuchsleitung, um die Personenanzahl im Fahrzeug auf zwei Haushalte zu reduzieren.

Weiterhin wurden die Einweisung in die Studie und das Fahrzeug zu Beginn sowie das Ausfüllen des soziodemographischen Fragebogens am Ende des Versuchs außerhalb des Fahrzeugs im Freien durchgeführt, um die Dauer der Testung im Versuchsfahrzeug als geschlossener Raum so kurz wie möglich zu halten. Darüber hinaus wurde das Versuchsfahrzeug sowie die Testungsmaterialien vor jedem neuen Probanden

desinfiziert. Weitere Maßnahmen sind im Hygienekonzept (siehe Anhang A) zusammengefasst.

Die Probanden wurden über persönliche Ansprache rekrutiert und waren allesamt Angestellte der Technischen Universität Braunschweig (Land Niedersachsen). Aus versicherungsrechtlichen Gründen nahmen die Probanden während der regulären Arbeitszeit an der Studie teil. Aus diesem Grund erhielten die Probanden neben ihrem Arbeitsentgelt keine weitere Aufwandsentschädigung für die Teilnahme an der Realfahrtstudie. Die Realfahrtstudie inklusive eines entsprechenden Hygienekonzepts wurden von der Ethikkommission der Fakultät für Lebenswissenschaften sowie vom Krisenstab der Technischen Universität Braunschweig genehmigt.

5.3.2 Ergebnisse: Gerade Hauptstraße

5.3.2.1 Manipulationskontrolle

Um in diesem Fahrscenario zu gewährleisten, dass die Ausprägung des lateralen Versatzes im eigenen Fahrstreifen jeweils mit dem Versuchsplan übereinstimmen, wurden die Fahrzeugdaten (Position im eigenen Fahrstreifen, Geschwindigkeit) zu jedem Messzeitpunkt aufgezeichnet. Auf dieser Weise ist es möglich, die Manipulation dieser Einflussgröße zu kontrollieren. Wenn die Manipulation gelungen ist, ist die Abweichung des tatsächlichen lateralen Versatzes in der Studie vom Versuchsplan sehr gering.

Abbildung 80 zeigt für einen Probanden die Trajektorie des Ego-Fahrzeugs im eigenen Fahrstreifen über den gesamten Verlauf des Fahrscenarios. Zu Beginn des Fahrscenarios vor dem Aufbau des lateralen Versatzes (± 0.5 m von der Fahrstreifenmitte je nach Versuchsbedingung) zeigte das Fahrzeug leichte Abweichungen von der Fahrstreifenmitte, welche sich in einer Größenordnung von ± 0.1 m bewegten. Diese Schwankungen sind auf die Trägheit und die Regelung des Fahrzeugs zurückzuführen und nicht vermeidbar. Gemäß dem Versuchsplan begann das Fahrzeug kurz vor der Fußgängerin einen Versatz um 0.5 m nach links bzw. rechts aufzubauen. Das Maximum des lateralen Versatzes war auf Höhe der Fußgängerin erreicht. Entsprechend ist die Umsetzung der Ausprägungen des lateralen Versatzes insgesamt gelungen.

Jedoch zeigen sich leichte Abweichungen zwischen den beiden Versuchsbedingungen. Während der laterale Versatz nach links den angestrebten Zielwert von 0.5 m Abweichung von der Fahrstreifenmitte erreicht wird, fällt der laterale Versatz nach rechts mit circa 0.4 m Abweichung von der Fahrstreifenmitte geringer als geplant aus. Diese leichte Abweichung vom Versuchsplan ist durch die Trägheit des Fahrzeugs erklärbar und nicht zu vermeiden.

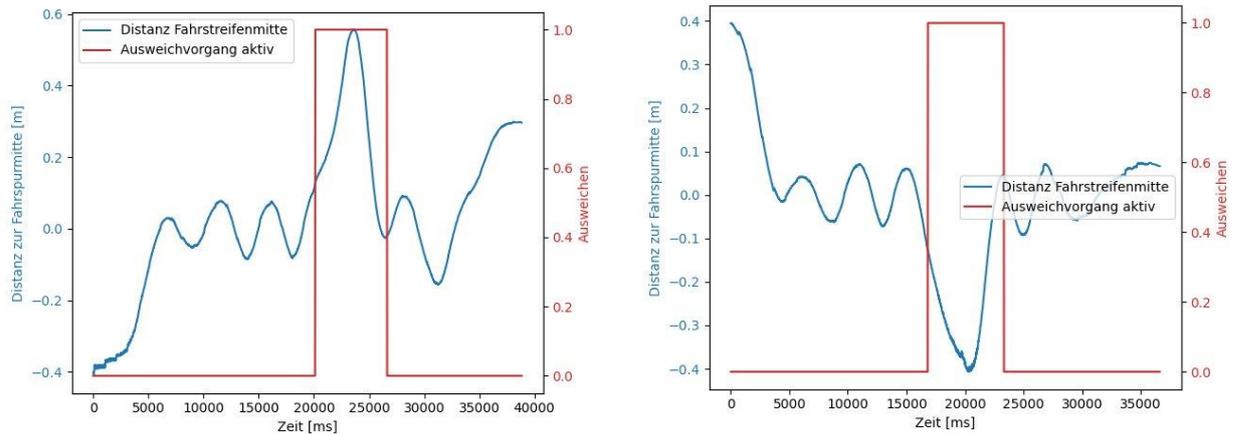


Abbildung 80: Trajektorie des Ego-Fahrzeugs über den gesamten Verlauf des Fahr Szenarios hinweg. Links: Lateraler Versatz nach links. Rechts: Lateraler Versatz nach rechts.

5.3.2.2 Erlebtes Risiko und Fahrkomfort

Tabelle 26 gibt einen Überblick über die mittleren Risiko- und Komfortbewertungen für alle Varianten des Fahr Szenarios.

Tabelle 26: Risiko- und Komforterleben der Mitfahrer (Mittelwerte und Standardabweichungen) für jede Variante des Fahr Szenarios

	Gegenverkehr	Lateraler Versatz		
		Links	Keiner	Rechts
Erlebtes Risiko	ja	2.60 (1.65)	2.00 (1.56)	2.70 (1.77)
	nein	1.80 (1.55)	2.40 (2.22)	2.20 (1.32)
Vertrauen in die Automation	ja	3.90 (1.20)	4.30 (0.95)	3.50 (1.08)
	nein	4.40 (0.97)	4.10 (1.20)	4.00 (0.94)
Selbst fahren	ja	2.50 (1.78)	2.30 (1.64)	2.90 (1.85)
	nein	2.20 (1.48)	2.30 (1.57)	2.60 (1.78)
Kontrollverlust	ja	2.30 (1.16)	2.10 (1.10)	2.50 (1.27)
	nein	1.90 (0.88)	2.00 (0.94)	2.20 (1.40)

Bei der Frage, wie risikoreich und komfortabel die Simulatorfahrten aus Mitfahrersicht waren, ergaben die zwei-faktorielle Varianzanalysen zwei signifikante Hauptwirkungen der Einflussgröße Gegenverkehr auf das erlebte Risiko und das Vertrauen der Mitfahrer in die Automation. Die Analysen zeigten keine weiteren signifikanten Haupt- oder Wechselwirkungen. Die weiteren Ergebnisse der Analysen sind in Tabelle 27 zusammengefasst.

Tabelle 27: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf das Risiko- und Komforterleben von Mitfahrern im hochautomatisierten Fahrzeug. Dargestellt sind die F- und p-Werte der Varianzanalyse, die zugehörigen Freiheitsgrade (df) und die Schätzung der Effektgröße.

		<i>F</i>	<i>df</i>	<i>p</i>	η^2_{par}
Erlebtes Risiko	Lateraler Versatz (L)	0.3	1.6,13.8	.720	.39
	Gegenverkehr (G)	5.7	1,9	.041	
	L x G	1.2	2,18	.324	
Vertrauen in die Automation	L	1.4	2,18	.263	.53
	G	10.3	1,9	0.11	
	L x G	1.6	2,18	.235	
Selbst fahren	L	1.0	2,18	.393	
	G	1.1	1,9	.329	
	L x G	0.2	2,18	.837	
Kontrollverlust	L	0.7	1.2,10.9	.454	
	G	5.0	1,9	.053	
	L x G	0.3	2,18	.766	

Wie Abbildung 81 zeigt, waren erlebte Risiko in den Versuchsbedingungen ohne Gegenverkehr signifikant höher als in den Versuchsbedingungen mit Gegenverkehr. Analog dazu zeigte sich dieselbe Effektrichtung auch für das Vertrauen der Mitfahrer in die Automation. Trotz der Signifikanz der beiden Hauptwirkungen unterscheiden sich die Mittelwerte jedoch lediglich um 0.3 Skaleneinheiten auf der jeweiligen Skala. Das erlebte Risiko der Mitfahrer liegt in beiden Versuchsbedingungen mit und ohne Gegenverkehr zwischen den beiden Skaleneinheiten „mittel unangenehm“ und „sehr unangenehm“, wobei die Mittelwerte zwischen den Skaleneinheiten 2 „wenig unangenehm“ und 5 „wenig gefährlich“ streuen. Das Vertrauen in die Automation liegt im Mittel ungefähr beim Skaleneinheit 4, also ein hohes Vertrauen der Mitfahrer, wobei die Mittelwerte in der oberen Hälfte der Skala streuen.

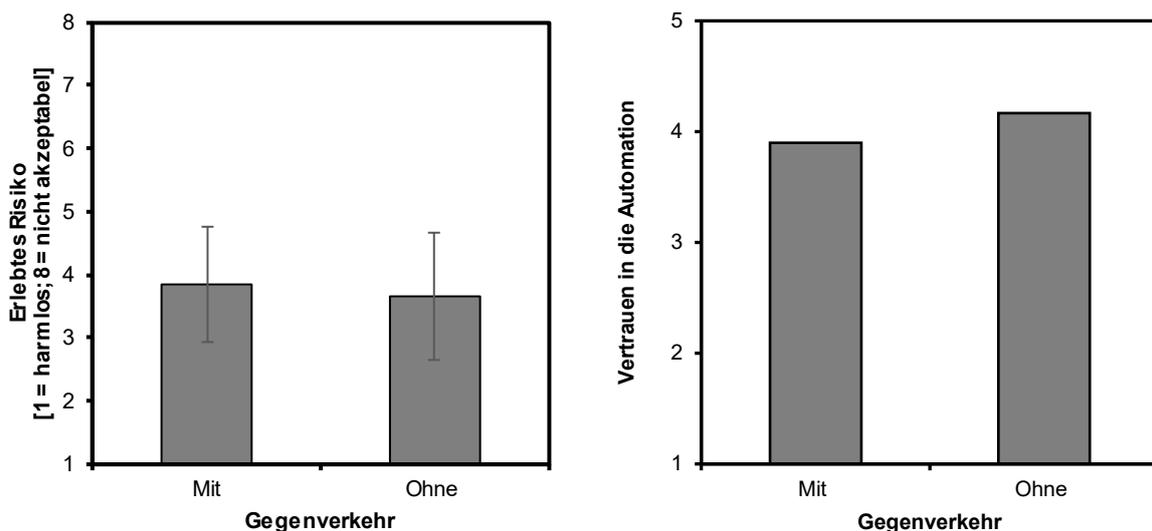


Abbildung 81: Links: Risikobewertung (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit des Gegenverkehrs (G). Rechts: Vertrauen in die Automation (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit des Gegenverkehrs (G).

Insgesamt ist damit für das erlebte Risiko aus Mitfahrersicht festzuhalten:

- Über alle Versuchsbedingungen hinweg wurde die Interaktionssituation als unangenehm, aber im Mittel nicht als gefährlich bewertet.
- Dabei waren die Bewertungen des erlebten Risikos unabhängig vom lateralen Versatz im eigenen Fahrstreifen.
- Bei Gegenverkehr ist das erlebte Risiko signifikant höher als ohne Gegenverkehr, wobei sich die mittleren Bewertungen in beiden Fällen im unangenehmen Bereich, zwischen den Skalenpunkten „mittel unangenehm“ und „sehr unangenehm“ liegen. Ein ähnliches Ergebnismuster zeigte sich auch beim Komforterleben.
- Das Vertrauen in die Automation ist insgesamt sehr hoch ausgeprägt, jedoch zeigen sich auch hier signifikante Unterschiede. So ist das Vertrauen der Mitfahrer bei Gegenverkehr signifikant niedriger als ohne Gegenverkehr.

5.3.3 Ergebnisse: Einmündung

In diesem Fahrscenario wurden sowohl Fragebogendaten zum Risiko und Komforterleben der Mitfahrer, als auch Fahrdaten analysiert. Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Fragebogendaten berichtet und im Anschluss daran die Ergebnisse der Fahrdaten. Tabelle 28 bietet einen Überblick über die mittleren Risiko- und Komfortbewertungen für alle Varianten des Fahrscenario.

5.3.3.1 Subjektive Daten

Tabelle 28: Risiko- und Komforterleben der Mitfahrer (Mittelwerte und Standardabweichungen) für jede Variante des Fahrscenario.

		Faktor B: Bremszeitpunkt	Faktor C: Geschwindigkeit	
			30 km/h	50 km/h
Erlebtes Risiko	Fußgänger	ideal	1.30 (0.48)	1.60 (0.52)
		letzter, akzeptierter	2.70 (2.11)	3.00 (1.94)
	Radfahrer	ideal	1.30 (0.68)	1.80 (1.32)
		letzter, akzeptierter	2.40 (1.58)	2.80 (1.55)
Vertrauen in die Automation	Fußgänger	ideal	4.80 (0.42)	4.40 (1.08)
		letzter, akzeptierter	4.20 (1.23)	3.90 (0.99)
	Radfahrer	ideal	4.90 (0.32)	4.40 (0.97)
		letzter, akzeptierter	4.30 (0.82)	4.10 (0.99)
Selbst fahren	Fußgänger	ideal	1.80 (1.32)	2.30 (1.25)
		letzter, akzeptierter	2.30 (1.42)	2.60 (1.43)
	Radfahrer	ideal	1.70 (1.34)	2.00 (1.33)
		letzter, akzeptierter	1.90 (1.37)	2.30 (1.34)
Kontrollverlust	Fußgänger	ideal	1.60 (0.84)	2.10 (1.20)
		letzter, akzeptierter	1.90 (0.99)	2.70 (1.49)
	Radfahrer	ideal	1.50 (0.71)	2.00 (1.16)
		letzter, akzeptierter	2.00 (1.16)	2.30 (1.25)

Bei der Frage, wie risikoreich und komfortabel die Simulatorfahrten aus Mitfahrersicht waren, ergaben die zwei-faktorielle Varianzanalysen drei signifikante Hauptwirkungen der Einflussgröße Bremszeitpunkt auf das erlebte Risiko, das Vertrauen der Mitfahrer in die Automation sowie den erlebten Kontrollverlust während der automatisierten Fahrt. Die

Analysen zeigten keine weiteren signifikanten Haupt- oder Wechselwirkungen. Die weiteren Ergebnisse der Analysen sind in Tabelle 29 zusammengefasst.

Tabelle 29: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf das Risiko- und Komforterleben von Mitfahrern im hochautomatisierten Fahrzeug. Dargestellt sind die F- und p-Werte der Varianzanalyse, die zugehörigen Freiheitsgrade (df) und die Schätzung der Effektgröße.

		<i>F</i>	<i>df</i>	<i>p</i>	η^2_{par}
Erlebtes Risiko	Bremszeitpunkt (B)	7.5	1,9	.023	.46
	Geschwindigkeit (G)	4.2	1,9	.071	
	Verkehrsteilnehmer (V)	0.2	1,9	.708	
	B x G	0.0	1,9	.917	
	B x V	0.5	1,9	.519	
	G x V	0.1	1,9	.755	
	B x G x V	0.0	1,9	.893	
Vertrauen in die Automation	B	12.9	1,9	.006	.59
	G	2.3	1,9	.163	
	V	2.3	1,9	.168	
	B x G	0.3	1,9	.574	
	B x V	0.2	1,9	.678	
	G x V	0.0	1,9	1.00	
	B x G x V	0.3	1,9	.591	
Selbst fahren	B	1.0	1,9	.337	
	G	1.5	1,9	.257	
	V	8.4	1,9	.017	
	B x G	0.0	1,9	.924	
	B x V	2.0	1,9	.193	
	G x V	0.1	1,9	.758	
	B x G x V	2.0	1,9	.193	
Kontrollverlust	B	8.6	1,9	.016	.49
	G	3.9	1,9	.081	
	V	0.6	1,9	.453	
	B x G	0.1	1,9	.780	
	B x V	0.1	1,9	.811	
	G x V	1.1	1,9	.322	
	B x G x V	0.6	1,9	.453	

Wie in Abbildung 82 dargestellt wird, bewerteten die Mitfahrer das erlebte Risiko zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt signifikant höher als zum idealen Bremszeitpunkt. Zum idealen Bremszeitpunkt liegt die mittlere Risikobewertung zwischen den Skalenpunkten 1 „harmlos“ und 2 „wenig unangenehm“, wohingegen das mittlere Risiko zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt zwischen den Skalenpunkten 2 „wenig unangenehm“ und 3 „mittel unangenehm“ liegt. Über beide Bremszeitpunkte hinweg liegen die Mittelwerte in der unteren Skalenhälfte, in der Kategorie „unangenehm“. Hierbei ist jedoch auffällig, dass die mittlere Risikobewertung zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt verglichen mit der mittleren Risikobewertung zum idealen Bremszeitpunkt einer breiten Streuung unterliegt.

Analog zu diesem Ergebnis bewerteten die Mitfahrer das Vertrauen in die Automation (siehe Abbildung 83 links) zum idealen Bremszeitpunkt signifikant höher und den Kontrollverlust (siehe Abbildung 83 rechts) entsprechend signifikant niedriger als zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt. Das Vertrauen in die Automation bewerteten Mitfahrer über beide Bremszeitpunkt hinweg als sehr hoch, mit Mittelwerten zwischen den Skalenpunkten 4 und 5. Den Kontrollverlust bewerteten die Mitfahrer als niedrig.

Hierbei liegt die mittlere Bewertung zum idealen Bremszeitpunkt zwischen den Skalenpunkten 1 und 2. Zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt liegt die mittlere Bewertung zwischen den Skalenpunkten 2 und 3.

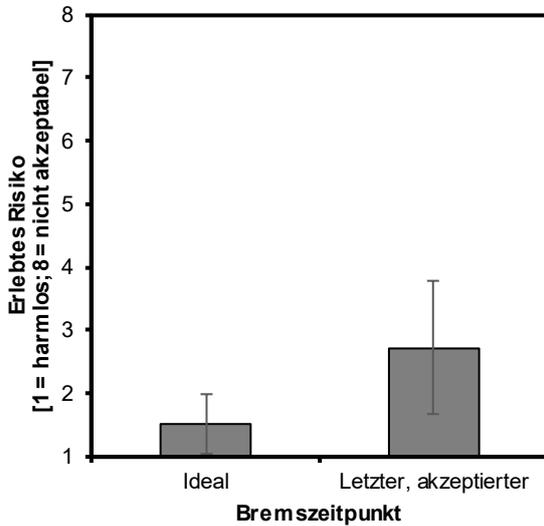


Abbildung 82: Risikobewertung (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit des Bremszeitpunkts (B).

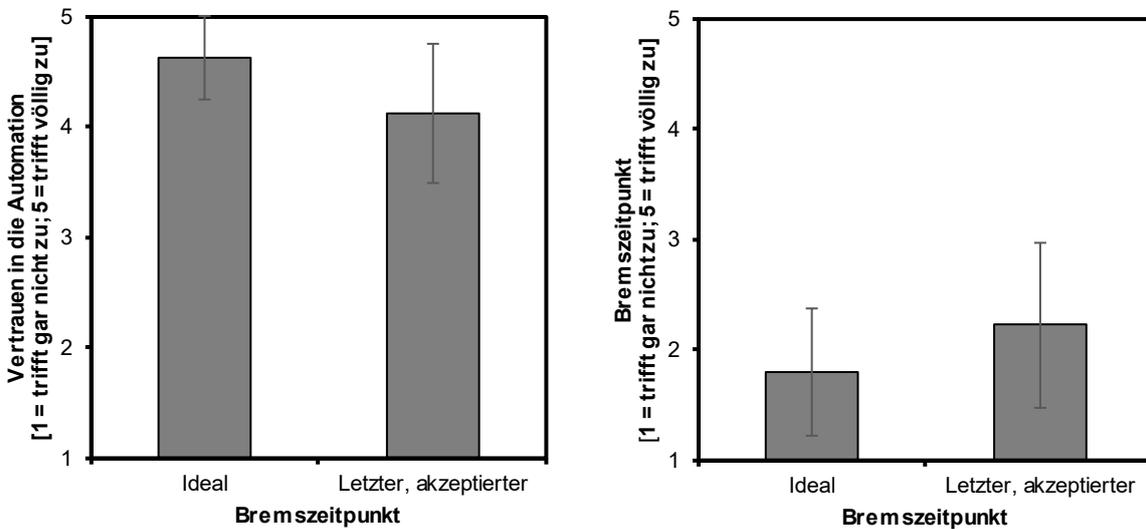


Abbildung 83: Links: Vertrauen in die Automation (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit des Bremszeitpunkts (B). Rechts: Kontrollverlust (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit des Bremszeitpunkts (B).

5.3.3.2 Distanz zur Haltelinie

Tabelle 30 bietet einen Überblick über die mittleren Distanz für alle Varianten des Fahrzenarios.

Tabelle 30: Distanz zur Haltelinie (Mittelwerte und Standardabweichungen) für jede Variante des Fahrzenarios.

	Faktor A: Verkehrsteilnehmer	Faktor B: Bremszeitpunkt	Faktor C: Geschwindigkeit	
			30 km/h	50 km/h
Distanz zur Haltelinie	Fußgänger	ideal	40.73 (6.23)	68.57 (18.89)
		letzter, akzeptierter	24.87 (6.51)	39.22 (7.60)
	Radfahrer	ideal	36.67 (8.92)	63.00 (13.21)
		letzter, akzeptierter	21.11 (5.60)	43.85 (11.78)

Bei der Frage, wann ein automatisiertes Fahrzeug beim Heranfahren an eine Einmündung idealerweise mit dem Bremsvorgang beginnen soll, ergab die drei-faktorielle Varianzanalyse (Faktor A: Verkehrsteilnehmer, Faktor B: Bremszeitpunkt, Faktor C: Geschwindigkeit) weder signifikante Hauptwirkungen noch Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen für beide Anfahrtgeschwindigkeiten des automatisierten Fahrzeugs (30 km/h, 50 km/h; siehe Tabelle 31).

Tabelle 31: Hauptwirkungen und Wechselwirkungen der untersuchten Einflussgrößen auf die Distanz zur Haltelinie bei Betätigung des Knopfes. Dargestellt sind die F- und p-Werte der Varianzanalyse, die zugehörigen Freiheitsgrade (df) und die Schätzung der Effektgröße.

		F	df	p	η^2_{par}
Distanz zur Haltelinie	Bremszeitpunkt (B)	80.4	1,9	< .001	.89
	Geschwindigkeit (G)	62.8	1,9	< .001	.88
	Verkehrsteilnehmer (V)	1.8	1,9	.217	
	B x G	10.8	1,9	.009	.55
	B x V	3.7	1,9	.086	
	G x V	0.9	1,9	.370	
	B x G x V	1.7	1,9	.220	

Wie in Abbildung 84 dargestellt wird, ergab die drei-faktorielle Varianzanalyse eine signifikante Wechselwirkung zwischen den Einflussfaktoren Bremszeitpunkt und Geschwindigkeit auf die Distanz zur Haltelinie.

Bei einer Anfahrtgeschwindigkeit von 50 km/h liegt die Distanz zur Haltelinie im Mittel idealerweise bei $M = 65.8$ m und bei $M = 41.5$ m zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt. Demgegenüber liegt die Distanz zur Haltelinie bei einer Anfahrtgeschwindigkeit von 30 km/h im Mittel idealerweise bei $M = 38.2$ m und bei $M = 23.0$ m zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt. Die Differenz zwischen dem idealen und letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt ist bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h größer als bei einer geringeren Geschwindigkeit von 30 km/h, wodurch eine Wechselwirkung zwischen den beiden Einflussfaktoren auf die Distanz zur Haltelinie entsteht.

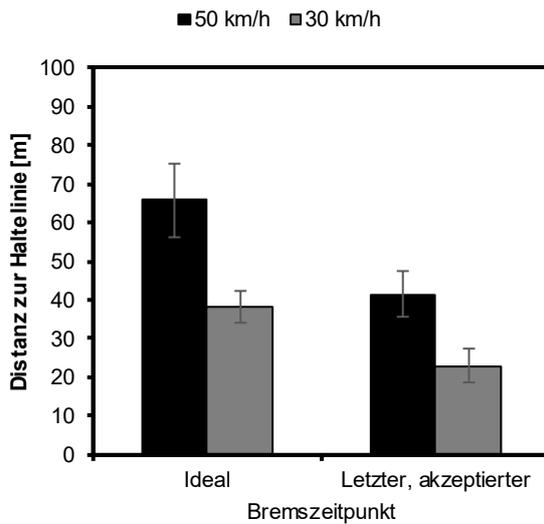


Abbildung 84: Distanz zur Haltelinie (Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall) in Abhängigkeit des Bremszeitpunkts (B) und der Geschwindigkeit (G).

Insgesamt lässt sich für die Risikobewertung zum idealen und letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt folgendes festhalten:

- Die Ergebnisse der Risikobewertungen deuten insgesamt darauf hin, dass alle Verkehrsteilnehmer das erlebte Risiko in der Interaktion mit automatisierten Fahrzeugen zu minimieren möchten, was sich in den mittleren Risikobewertungen zum idealen Bremszeitpunkt zeigt.
- Diese Tendenz wird auch zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt deutlich. Hier akzeptieren Mitfahrer ein automatisiertes Fahrverhalten, welches sie höchstens als sehr unangenehm, aber nicht als gefährlich bewerten. Das bedeutet, dass Menschen diesen gefährlichen, riskanten Bereich möglichst vermeiden wollen.
- Dabei ist für Mitfahrer im hochautomatisierten Fahrzeug nicht relevant mit welchem Verkehrsteilnehmer (Fußgänger, Radfahrer) sie an der Einmündung interagieren.

Insgesamt lässt sich für die Distanz des automatisierten Fahrzeugs zur Haltelinie zum idealen bzw. zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt folgendes festhalten:

- Bei einer Anfahrtgeschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs von 30 km/h sollte das automatisierte Fahrzeug aus Mitfahrersicht idealerweise ungefähr 38 m vor der Einmündung mit dem Bremsvorgang beginnen, spätestens aber 23 m vor der Haltelinie.
- Bei einer Anfahrtgeschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs von 50 km/h sollte das automatisierte Fahrzeug ungefähr 66 m vor der Haltelinie mit dem Bremsvorgang beginnen, spätestens aber spätestens aber 42 m vor der Haltelinie.

5.3.4 Diskussion

Die Realfahrtstudie untersuchte zwei Fahrscenarien, eine gerade Hauptstraße und eine Einmündung und diente zur Validierung der Ergebnisse vorheriger Online- und Fahrscenariostudien. Die Probanden nahmen in dieser Studie ausschließlich die Perspektive eines Mitfahrers im hochautomatisierten Fahrzeug ein. Im Fahrscenario Gerade Hauptstraße untersucht die Studie das erlebte Risiko und den Fahrkomfort von Mitfahrern im automatisierten Fahrzeug in der Interaktion mit einem Fußgänger im städtischen Längsverkehr. Dazu wurde eine innerstädtische gerade Hauptstraße mit seitlichen Parkständen als im Vehicle-in-the-Loop umgesetzt. Bei wurde die Präsenz von Gegenverkehr (mit, ohne) und das Fahrverhalten des automatisierten Fahrzeugs variiert. Das automatisierte Fahrverhalten variierte im Hinblick auf die gefahrene Geschwindigkeit (30 km/h, 50 km/h) und die Spurmittenführung im eigenen Fahrstreifen (Versatz nach links, Versatz nach rechts, ohne Versatz) als Anpassung der Trajektorie. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, die Fahrumgebung und das Fahrverhalten des automatisierten Fahrzeugs während der automatisierten Fahrt zu beobachten.

Im Fahrscenario „Einmündung“ untersuchte die Studie aus Mitfahrersicht, wann ein hochautomatisiertes Fahrzeug beim Heranfahen an eine Einmündung beginnen soll, abzubremesen, damit sich die beteiligten Verkehrsteilnehmer in der Interaktion mit dem Fahrzeug sicher fühlen. Dazu wurde die Einmündungssituation im Vehicle-in-the-Loop umgesetzt. Dabei wurden die Anfahrtgeschwindigkeit des hochautomatisierten Fahrzeugs an die Einmündung (30 km/h, 50 km/h) und der Verkehrsteilnehmer (Fußgänger, Radfahrer) variiert. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, die Distanz zur Haltelinie zum idealen Bremszeitpunkt sowie zum letzten, akzeptierten Zeitpunkt mittels Knopfdruck manuell einzustellen. Nach jeder manuellen Einstellung sahen die Probanden ein Video mit der ausgewählten Distanz bzw. mit wenigen Metern Abweichung. Nach einer möglichen Korrektur dieser eingestellten Distanz bewerteten die Probanden ihr erlebtes Risiko. Dieses Vorgehen wurde auf alle Varianten des Fahrscenarios angewendet.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Realfahrtstudie im Hinblick auf die Forschungsfragen zusammengefasst, diskutiert und methodisch bewertet. Im Anschluss an die Diskussion der Validierungsstudie werden die Ergebnisse mit denen der zuvor durchgeführten Probandenstudien verglichen und die Ergebnisse aller Probandenstudien zusammenfassend diskutiert.

5.3.4.1 Gerade Hauptstraße

Wie verändert sich das erlebte Risiko und der Fahrkomfort von Mitfahrern in der Interaktion mit einem Fußgänger in Abhängigkeit von verschiedenen Auslegungen der automatisierten Fahrfunktion?

Wie zuvor in der Fahrscenariostudie) waren die Mitfahrer nach jeder erlebten Situation befragt worden, wie sie den Fahrkomfort und das erlebte Risiko in der vorangegangenen Situation erlebten.

Über alle Situationen hinweg zeigte sich ein ähnliches Ergebnismuster wie zuvor in der Fahrscenariostudie. Das erlebte Risiko wurde im Mittel als harmlos bis sehr unangenehm, aber im Mittel nicht als gefährlich bewertet. Ebenso wurde der Fahrkomfort im Mittel als durchschnittlich bis hoch bewertet, wobei die Bewertungen des erlebten Risikos und des Fahrkomforts in den Versuchsbedingungen ohne Gegenverkehr positiver

ausfallen als in den Versuchsbedingungen mit Gegenverkehr. Dennoch liegen die mittleren Bewertungen des erlebten Risikos und des Vertrauens in die Automation in einem akzeptablen Bereich. Die mittleren Bewertungen des erlebten Risikos liegen allesamt in der unteren Hälfte der Skala, sodass Mitfahrer die automatisierte Fahrt höchstens als unangenehm, aber nicht als gefährlich bewerteten. Zudem sind die Mittelwertsunterschiede bei den gefundenen Hauptwirkungen sehr gering. Somit bestätigen die Ergebnisse der Realfahrtstudie die vorherige Fahrsimulatorstudie.

Im Gegensatz zur Fahrsimulatorstudie waren die Bewertungen in dieser Realfahrtstudie jedoch unabhängig vom lateralen Versatz des automatisierten Fahrzeugs im eigenen Fahrstreifen. In diesem Zusammenhang zeigte die Manipulationskontrolle, dass die Spurmittenführung des ViL Fahrzeugs Schwankungen von bis zu 10 cm betrug. Diese Schwankungen könnten zu einer reduzierten Wahrnehmung des lateralen Versatzes im eigenen Fahrstreifen geführt haben. Aus diesem Grund ist es möglich, dass Probanden den lateralen Versatz nicht bemerkten, sodass die Variation keine signifikante Wirkung auf das Komfort- und Risikoerleben der Mitfahrer im hochautomatisierten Fahrzeug hatte. Demgegenüber war die Spurmittenführung des hochautomatisierten Fahrzeugs im Fahrsimulator perfekt mittig ausgelegt, sodass die Variationen des lateralen Versatzes um 0.5 m nach links bzw. nach rechts deutlicher wahrnehmbar waren, was sich in der signifikanten Wirkung auf das Risiko- und Komforterleben der Mitfahrer zeigte. Dies könnte die Unterschiede im Hinblick auf die Wirkung des lateralen Versatzes zwischen Fahrsimulator und Realfahrtstudie erklären.

Wie möchten Mitfahrer in der Interaktion mit einem Fußgänger in dieser Fahrsituation idealerweise gefahren werden?

Insgesamt deuten die Ergebnisse der Realfahrtstudie darauf hin, dass Mitfahrer in Fußgängerinteraktionen risikoärmsten bewerteten, in denen kein Gegenverkehr vorhanden war. Bezogen auf den lateralen Versatz zeigten die Analysen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchsbedingungen. Vielmehr lag das automatisierte Fahrverhalten über alle Versuchsbedingungen hinweg im akzeptablen Bereich.

Zusammenfassende Empfehlung für die Auslegung hochautomatisierten Fahrverhaltens

Um eine möglichst niedrige Risikobewertung aus Sicht der Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug zu erreichen, empfiehlt sich unter Rückbezug der Ergebnisse der vorherigen Onlinestudie für die Anpassung einer automatisierten Fahrfunktion Folgendes:

- Um eine möglichst risikoarme Auslegung der automatisierten Fahrfunktion zu erreichen, ist eine Orientierung an der geltenden zulässigen Höchstgeschwindigkeit zu empfehlen.
- Darüber hinaus ist das Fahren eines lateralen Versatzes nach links nur ohne Gegenverkehr zu empfehlen, ein lateraler Versatz nach rechts ist nicht im Sinne einer risikoarmen Auslegung.

- Bei niedriger Geschwindigkeit (30 km/h) ist eine Verzögerung im Umfang von ca. 1 m/s mit einer Geschwindigkeitsreduktion von ca. 3 – 4 km/h zu empfehlen, jedoch nicht höherer Geschwindigkeit (50 km/h).

5.3.4.2 Einmündung

Welchen Bremsbeginn präferieren Mitfahrer im hochautomatisierten Fahrzeug, wenn das Fahrzeug, in dem sie sich befinden, auf eine Einmündung zufährt und einem schwächeren Verkehrsteilnehmer Vorfahrt gewähren muss? Welchen Bremsbeginn finden Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug im Hinblick auf ihr erlebtes Risiko gerade noch akzeptabel?

Insgesamt bewerteten Mitfahrer die Interaktionen mit den schwächeren Verkehrsteilnehmern als harmlos bis sehr unangenehm, aber im Mittel nicht als gefährlich. Zum idealen Bremszeitpunkt lagen die mittleren Risikobewertungen zwischen harmlos und wenig unangenehm, wobei das mittlere erlebte Risiko bei einer Anfahrtgeschwindigkeit von 50 km/h nur geringfügig höher war als bei 30 km/h. Zum letzten, akzeptierten Bremszeitpunkt lagen die mittleren Risikobewertungen dann im unangenehmen Bereich, wobei es aus Mitfahrersicht keinen Unterschied in der mittleren Risikobewertung zwischen der Anfahrtgeschwindigkeit von 30 km/h und 50 km/h gab.

Bei der Frage, in welcher Distanz zur Haltelinie das automatisierte Fahrzeug mit dem Bremsvorgang beginnen soll, zeigte sich, dass Mitfahrer ein frühes Bremsen insgesamt bevorzugen. Dabei war es unerheblich, ob ein Radfahrer oder ein Fußgänger die Einmündung querte. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug allgemein risikoreiche Interaktionen mit schwächeren Verkehrsteilnehmern möglichst vermeiden wollen. Dieser Befund bestätigt das Ergebnis der vorangegangenen Onlinestudie.

Zusammenfassende Empfehlung für die Auslegung hochautomatisierten Fahrverhaltens

Um eine möglichst niedrige Risikobewertung aus Sicht der Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug zu erreichen, empfiehlt sich unter Rückbezug der Ergebnisse der vorherigen Onlinestudie für die Anpassung einer automatisierten Fahrfunktion Folgendes:

- Um eine möglichst risikoarme Auslegung der automatisierten Fahrfunktion zu erreichen, ist für den Bremsbeginn eine Orientierung an der Distanz zum idealen Bremszeitpunkt zu empfehlen.
- Da Mitfahrer im automatisierten Fahrzeug in der Realfahrtstudie im Mittel größere Distanzen zur Haltelinie, d.h. eine frühere Reaktion auf die Interaktion mit dem schwächeren Verkehrsteilnehmer wünschen, sind diese Ergebnisse möglicherweise besser für die erste Generation hochautomatisierter Fahrzeuge geeignet.
- Dementsprechend liegt die Distanz zur Haltelinie idealerweise im Mittel bei 66 m (50 km/h) und bei 38 m (30 km/h).

5.3.5 Methodische Bewertung

Aufgrund der zeitintensiven Durchführung der Realfahrtstudie wurden diejenigen Varianten der Fahrsituationen ausgewählt, welche zuvor in den Probandenstudien zu „extremen“ Bewertungen geführt hatten.

Aus versicherungsrechtlichen Gründen wurden ausschließlich Angestellte der Technischen Universität Braunschweig als Probanden für die Vehicle-in-the-Loop Studie rekrutiert. Des Weiteren bestand die Stichprobe ausschließlich aus wissenschaftlichen Mitarbeitern (9 männlich) mit einer hohen Technikaffinität, gemessen auf der ATI Skala (Franke et al., 2019). Dies schränkt die Verallgemeinerung der erzielten Ergebnisse auf die allgemeine Fahrbevölkerung möglicherweise ein. Dennoch lässt sich im Vergleich zu den mit einer breiteren Stichprobe durchgeführten Fahrsimulator- und Onlinestudien feststellen, dass die Ergebnisse der ViL Studie die vorherigen Erkenntnisse insgesamt bestätigen, was darauf hindeutet, dass der Einfluss der Stichprobenszusammensetzung auf die erzielten Ergebnisse als gering einschätzen ist.

Über alle Probandenstudien hinweg ist zudem auffällig, dass die gefundenen Effekte im Fahrsimulator größer sind als in der Realfahrtstudie. Das könnte mehrere Gründe haben: Zum einen könnte die geringere Auflösung der VR Brille dazu geführt haben, dass die Immersion und in Folge dessen auch die subjektive Wahrnehmung der Mitfahrer, die Fahrsituation als real zu erleben, gering war und möglicherweise sogar geringer als im statischen Fahrsimulator. Des Weiteren ist auch denkbar, dass das experimentelle Setting im Forschungsfahrzeug ein entscheidender Faktor ist. Zum anderen befanden sich die Probanden auf einem abgesperrten Testgelände und die Studie wurde die ganze Zeit von einem Sicherheitsfahrer begleitet. Zusammen könnten diese methodischen Einflussfaktoren zu einer allgemeinen Unterschätzung des erlebten Risikos und gleichzeitig zu einer Überschätzung des Fahrkomforts geführt haben.

Des Weiteren zeigte die Manipulationskontrolle im Fahrszenario „Gerade Hauptstraße“, dass das System des Forschungsfahrzeugs zu Artefakten in der Umsetzung der Spurmittenführung führte, d.h. zu Schwankungen im eigenen Fahrstreifen, welche unabhängig von der Variation des lateralen Versatzes im eigenen Fahrstreifen ist.

5.4 Analyse verschiedener Belastungssituationen (TUBS)

5.4.1 Simulationsstudie

Für die Untersuchung des Zusammenhangs von Risiko und Leistungsfähigkeit des Verkehrssystems wurde in VTD (Virtual Test Drive) eine Simulationsstudie mit der automatisierten Fahrfunktion durchgeführt. Dafür wurden einige typische Szenarien an Knotenpunkten und Geraden im urbanen Umfeld betrachtet und das Verhalten des automatisierten Fahrzeugs in der Simulation aufgezeichnet. Diese entstandenen Daten wurden genutzt, um in SUMO (Simulation of Urban Mobility) den Einfluss des automatisierten Fahrzeugs auf das Verkehrssystem zu untersuchen.

Der Aufbau des für die Versuche genutzten Frameworks orientiert sich an dem in der Probandenstudie (siehe Kapitel 5.3) genutzten Framework. Das für diese Studie angepasste und verwendete Framework ist in Abbildung 85 dargestellt.

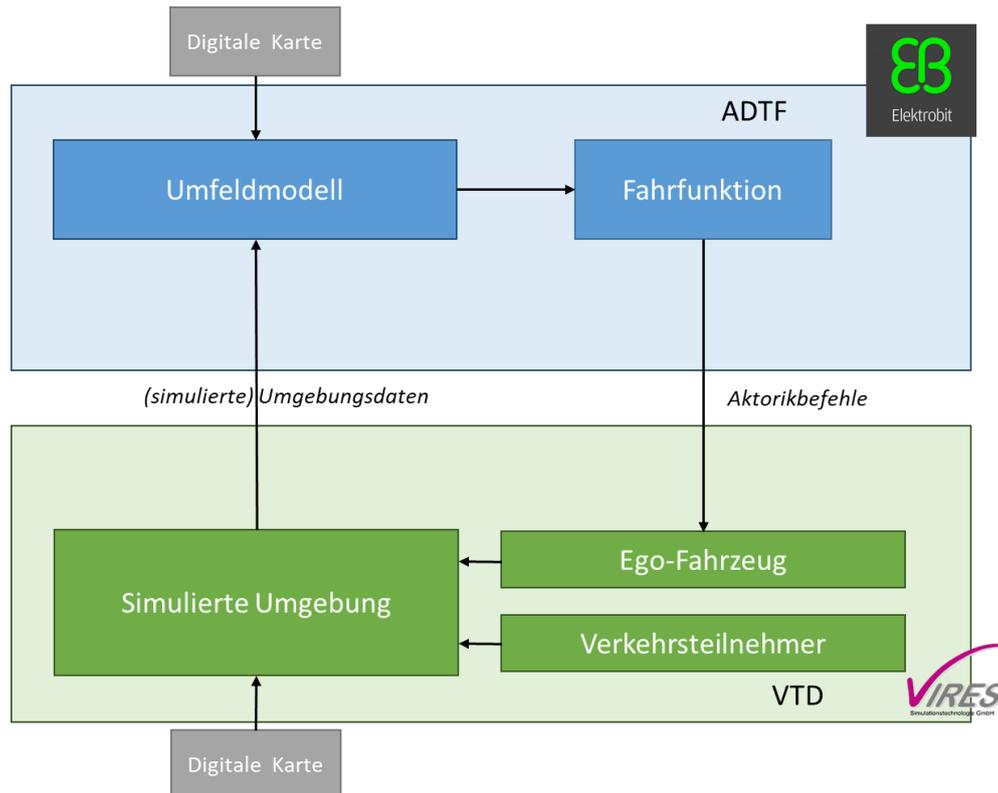


Abbildung 85: Kopplung des Software Frameworks (ADTF) und der Simulationsumgebung (VTD) für die Simulationsstudie.

Anders als bei der Probandenstudie war bei diesen Versuchen kein reales Fahrzeug involviert, sodass das Ego-Fahrzeug ebenfalls in VTD simuliert wurde. Die wichtigen Eingangsgrößen für das in VTD simulierte Fahrzeugmodell (beispielsweise die Geschwindigkeit, die Position, etc.) wurden direkt aus der Fahrfunktion genutzt und darauf basierend das Ego-Fahrzeug in der Simulation bewegt.

Die grundlegenden Beschreibungen der Simulationsumgebung VTD und des Software Frameworks (ADTF) sind in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** enthalten.

Im weiteren Verlauf werden daher nur die spezifischen Anpassungen der Simulationsumgebung und die Umsetzung der untersuchten Szenarien beschrieben.

5.4.1.1 Aufbau der digitalen Karten

Wie auch in der Probandenstudie, wurden für die Simulationsstudie digitale Karten erstellt. Diese Karten bildeten Knotenpunkte und Geraden aus Hannover und Braunschweig ab. Auch hier wurde zunächst eine Datenbasis mit einem 360° Laserscanner erstellt, der auf dem Fahrzeugdach eines Forschungsfahrzeugs des Instituts für Regelungstechnik angebracht ist. In REF_Ref70071956 \h * MERGEFORMAT Abbildung 86 ist beispielhaft ein damit aufgenommenes Luftbild der Kreuzung Podbielskistraße – Eulenkamp – Klingerstraße in Hannover abgebildet. Mit den entstandenen Luftbildern der entsprechenden Knotenpunkte wurden daraufhin identische Karten für VTD und ADTF zur Untersuchung der zugehörigen Szenarien erstellt. Die auf Basis des Luftbilds aus Abbildung 86 Abbildung 19: Datenbasis der Kreuzung

Podbielskistraße – Eulenkamp – Klingerstraße in Hannover (Knotenpunkt 3) entstandenen Karten sind in Abbildung 87 abgebildet.

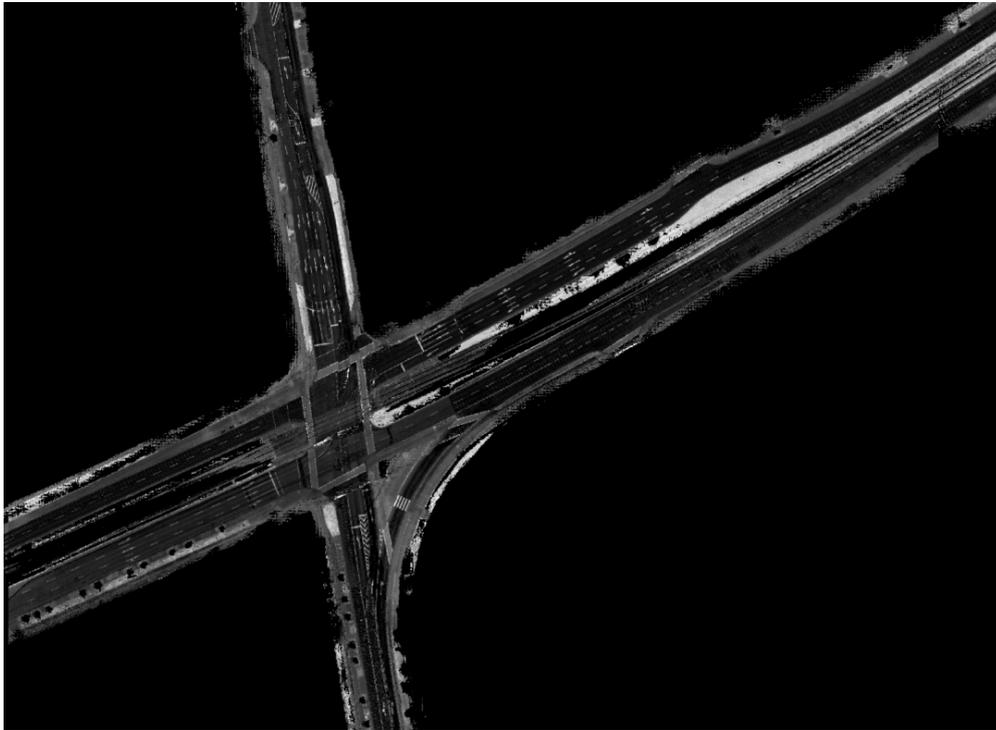


Abbildung 86: Datenbasis der Kreuzung Podbielskistraße – Eulenkamp – Klingerstraße in Hannover (Knotenpunkt 3).

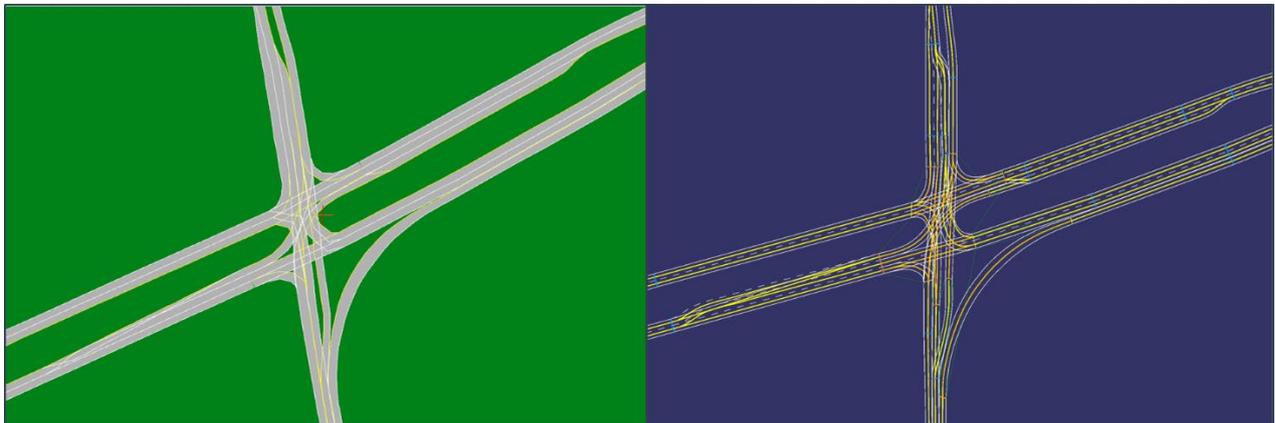


Abbildung 87: Erstellte digitale Karten für VTD (links) und ADTF (rechts), basierend auf der Kreuzung Podbielskistraße – Eulenkamp – Klingerstraße in Hannover (Knotenpunkt 3)

Insgesamt wurden Szenarien an sechs Straßenabschnitten in Hannover und Braunschweig implementiert. In Tabelle 32 sind die Straßenabschnitte aufgeführt, die für die Simulationsstudie betrachtet wurden. Für all diese Straßenabschnitte sind digitale Karten erzeugt worden.

Tabelle 32: Straßenabschnitte für die Szenarien in der Simulationsstudie

#	Straßenabschnitt	Koordinaten (UTM)	Straßentopologie
1	Rebenring/Geysostraße/Pockelstraße, Braunschweig	E: 604285.856 N: 5792781.441	Knotenpunkt
2	Spichernstraße/Lützeroderstraße /Drostestraße/Roberstraße, Hannover	E: 550568.377 N: 5804473.108	Knotenpunkt (Kreisverkehr)
3	Eulenkamp/Podbielskistraße /Klingerstraße, Hannover	E: 553857.414 N: 5806161.262	Knotenpunkt
4	Rebenring, Braunschweig	E: 604332.638 N: 5792783.319	Gerade
5	Arndtstraße/Vahrenwalderstraße /Hamburger Allee	E: 549928.150 N: 5804068.447	Knotenpunkt
6	Celler Straße/Hamburger Allee, Hannover	E: 550229.364 N: 5803779.508	Knotenpunkt

5.4.1.2 Aufbau und Umsetzung der Szenarien

Im Gegensatz zur Probandenstudie (siehe Kapitel 5.3) war für die Simulationsstudie keine 3D Modellierung der Umgebung nötig, da diese Modellierung lediglich für das menschliche Erleben eines Szenarios erzeugt wird. Für die Simulationsstudie sollten lediglich die Fahrdaten des Ego-Fahrzeugs und relevanter Verkehrsteilnehmer aufgezeichnet werden. Folglich reichten digitale Karten aus, auf der sich die Verkehrsteilnehmer und das Ego-Fahrzeug befanden. Im Weiteren werden die untersuchten Szenarien genauer erklärt und die erzeugten Daten beschrieben.

Die untersuchten Szenarien enthielten das Ego-Fahrzeug und andere Verkehrsteilnehmer. In den Szenarien an Knotenpunkten (1, 2, 3, 5, 6) wurden die Geschwindigkeiten des Ego-Fahrzeugs und die der anderen Verkehrsteilnehmer variiert. Am Beispiel des Knotenpunktes 6 und der Gerade 4 werden die verschiedenen Szenarien genauer beschrieben. Eine vollständige Liste der untersuchten Szenarien ist im Anhang in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** gegeben.

In Abbildung 88 links befindet sich das Ego-Fahrzeug auf einem Kreuzungsarm am Knotenpunkt 6 unten rechts im Bild und befuhr in verschiedenen Simulationsläufen jeden abgehenden Fahrstreifen. So bog es links und rechts ab und folgte dem Fahrstreifen in gerader Richtung (schwarze Pfeile). Dieses Vorgehen wurde für jeden Kreuzungsarm wiederholt, jeweils bei einer Ego-Geschwindigkeit von 50 km/h. Zudem wurden einige der gerade beschriebenen Szenarien mit einem vorausfahrenden Fahrzeug ergänzt. Dies betraf alle Szenarien auf denen dem Fahrstreifen in gerader Richtung gefolgt wird. Für die Abbiegevorgänge links und rechts wurden nur die Fahrstreifen mit der geringsten Krümmung betrachtet. Das vorausfahrende Fahrzeug hatte bei den entsprechenden Szenarien eine um 10 km/h und eine um 5 km/h verringerte Geschwindigkeit als das Ego-Fahrzeug.

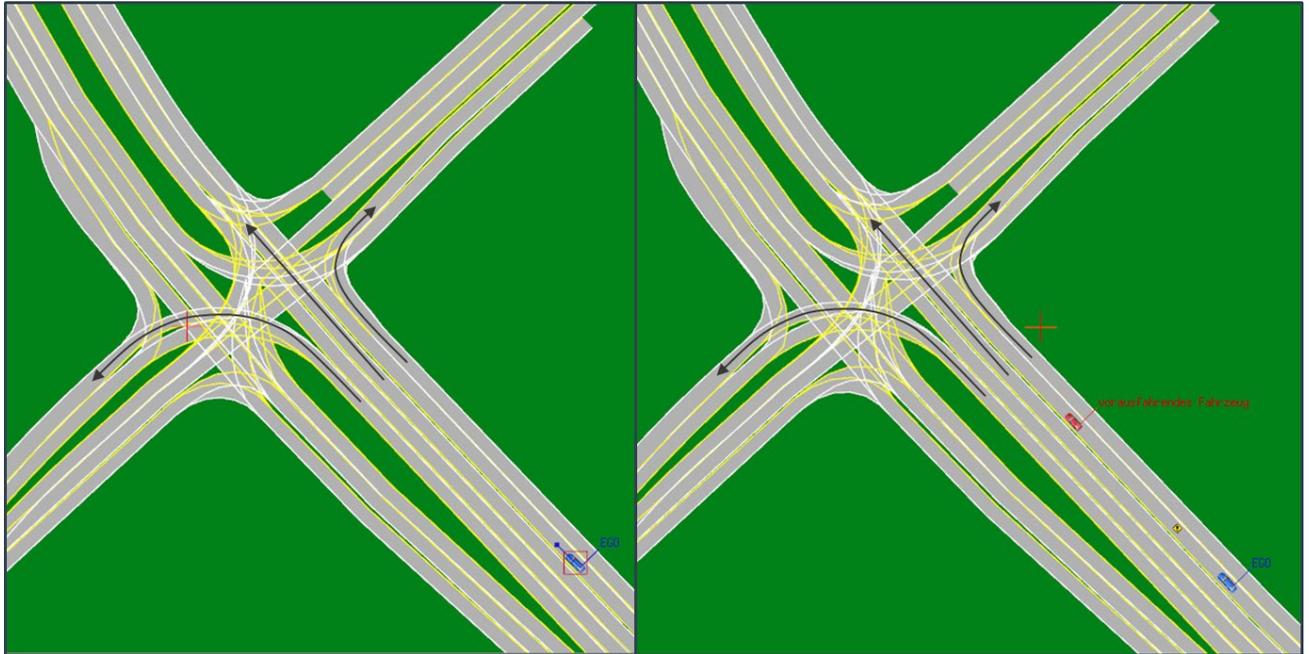


Abbildung 88: Szenarien am Beispiel des Knotenpunktes 6. Einige Szenarien wurden ohne vorausfahrendes Fahrzeug bei einer Ego-Geschwindigkeit durchgeführt, einige Szenarien mit einem vorausfahrenden Fahrzeug (40 km/h bzw. 45 km/h). Die schwarzen Pfeile markieren die Fahrtrichtungen.

Grundsätzlich wurde dieses Vorgehen an den Knotenpunkten 1, 3 und 5 wiederholt. Allerdings gab es einige Ergänzungen oder Variationen, die im Folgenden erläutert werden.

Knotenpunkt 3 war ein Kreisverkehr. Dieser wurde mit einer Ego-Geschwindigkeit von 50 km/h und 30 km/h befahren. In Szenarien mit vorausfahrendem Fahrzeug fuhr dieses 10 km/h bzw. 5 km/h langsamer als das Ego-Fahrzeug.

An Knotenpunkt 1 wurde zusätzlich unverträglich links abgebogen. Die Wunschgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs war auch hier 50 km/h; es kam in der Kreuzung zum Stehen und setzte den Weg fort, nachdem das entgegenkommende Fahrzeug das Ego-Fahrzeug passierte. Der Zeitpunkt des Anfahrens nach dem Haltevorgang wurde dabei variiert („früh“, „mittel“ und „spät“).

Die Gerade 4 wurde zunächst bei 50 km/h bzw. 30 km/h Ego-Geschwindigkeit ohne weitere Verkehrsteilnehmer befahren. Eine Ergänzung dieses Szenarios war ein vorausfahrendes Fahrzeug und ein querender Fußgänger.

In den Szenarien aus Abbildung 89 oben folgte das Ego-Fahrzeug dem Fahrstreifen bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h. Beim Passieren des Auslösungspunktes (gelbe Raute) querte der Fußgänger die Straße entlang der vordefinierten Trajektorie (Trajektorie_FG). Das Ego-Fahrzeug bremste auf den Fußgänger, ließ ihn passieren und setzte anschließend die Fahrt fort. Der Anfahrtszeitpunkt wurde auch hier variiert in „früh“, „mittel“ und „spät“.

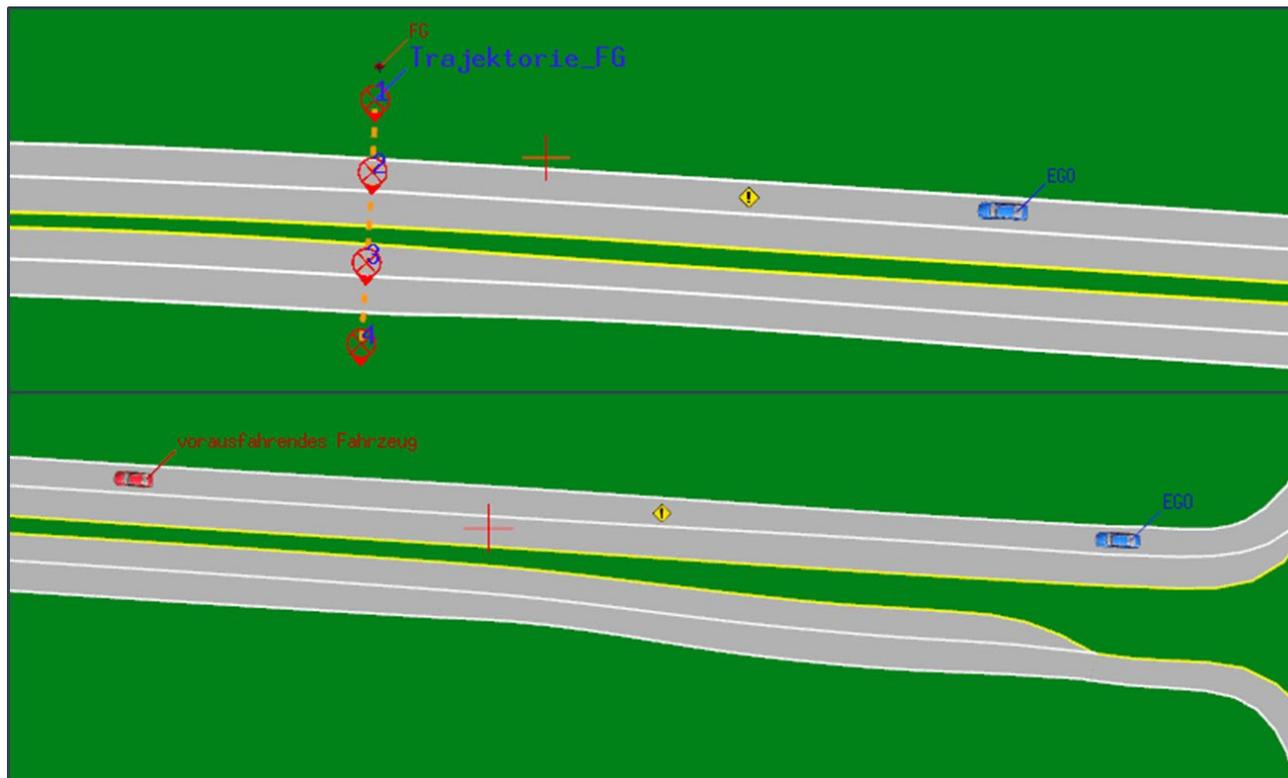


Abbildung 89: Szenarien am Beispiel der Geraden 4. Das Ego-Fahrzeug folgt der Geraden mit 30 km/h bzw. 50 km/h. In einigen Szenarien kreuzt ein Fußgänger die Fahrbahn, dem das Fahrzeug Vorfahrt gewähren muss (oben). In anderen Szenarien befindet sich ein vorausfahrendes Fahrzeug auf dem Ego-Fahrstreifen mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h bzw. 10 km/h geringer als der Ego-Geschwindigkeit.

Weiterhin wurden Szenarien bei einer Ego-Geschwindigkeit bei 50 km/h bzw. 30 km/h mit einem vorausfahrenden Fahrzeug durchgeführt (Abbildung 89 unten). Das vorausfahrende Fahrzeug fuhr dabei 5 km/h bzw. 10 km/h langsamer als das Ego-Fahrzeug.

5.5 Auswirkungen von automatisierten Fahrzeugen auf die Systemleistungsfähigkeit (TUBS)

5.5.1 Methodik

Für die Untersuchung der Auswirkungen von automatisierten Fahrzeugen auf die Systemleistungsfähigkeit im städtischen Bereich eignet sich aufgrund der Skalierbarkeit die mikroskopische Verkehrsflusssimulation. Hierfür wird die quelloffene Software SUMO (Simulation of Urban Mobility) (Lopez et al. 2018) verwendet. Die Anwendung stellt eine Vielzahl von Modellen für die Parametrisierung von longitudinalen, lateralen sowie Verhaltensweisen bei der Querung von Knotenpunkten zur Verfügung.

Erstellung des Netzwerks

Um die Systemleistungsfähigkeit auszuwerten, wird zunächst eine Basissimulation gemäß der realitätsgetreuen Topologie des ausgewählten Netzwerks erstellt. Der gewünschte Bereich, in unserem Fall Hannover-List, wird unter Verwendung eines

Editors für Geodaten (JOSM²) ausgewählt und anschließend exportiert. Dabei werden auf die frei verfügbaren Geodaten des OpenStreetMap³ (OSM) zurückgegriffen, um reales Kartenmaterial zu verwenden. Die exportierte OSM-Datei wird mit Hilfe eines SUMO-Tools (NETCONVERT (Krajzewicz et al. (2012))) ins erforderliche Format konvertiert. Das resultierende SUMO-Netzwerk muss schließlich manuell nachbereitet werden, da bei der Konvertierung Knotenpunkte mit separaten Abbiegestreifen teilweise fehlerhaft abgebildet werden. Das finale Netzwerk ist in Abbildung 90 zu sehen.



Abbildung 90: Hannover-List SUMO-Netzwerk. Die grünen Markierungen kennzeichnen die Knotenpunkte mit zur Verfügung stehenden Detektorzählungen.

Tabelle 33 fasst die Charakteristiken des Netzwerks zusammen.

Tabelle 33: Informationen zum SUMO-Netzwerk

Beschreibung	Wert
Bereich	5.88 km ²
Gesamtlänge der Kanten	117.45 km
Anzahl der Knotenpunkte	84
Anzahl der signalisierten Knotenpunkte	46

² <https://josm.openstreetmap.de/>

³ <https://www.openstreetmap.de/>

Kalibrierung der Verkehrsnachfrage

Für die Kalibrierung der Verkehrsnachfrage wurden Detektordaten aus realen Zählungen verwendet. Die Verkehrsmanagementzentrale Hannover hat für das Projekt Zählungen im Zeitraum von Anfang 2018 bis einschließlich Februar 2020 zur Verfügung gestellt. Tabelle 34 beinhaltet alle Knotenpunkte mit den zur Verfügung stehenden Detektordaten. Die aufgelisteten Knotenpunkte wurden zusätzlich in Abbildung 90 markiert.

Tabelle 34: Knotenpunkte mit zur Verfügung stehenden Detektorzählungen.

Lfd.-Nr.	ID	Knotenpunkt
1	136	Vahrenwalder Str. / Hamburger Allee
2	195	Vahrenwalder Str. / Niedersachsenring
3	193	Vahrenwalder Str. / Großer Kolonnenweg / Büttnerstr.
4	158	Hamburger Allee / Celler Str.
5	509	Podbielskistr. / Burckhardtstr. / Rühmkorfstr.
6	511	Walderseestr. / Bernadottenallee / Burckhardtstr.
7	510	Podbielskistr. / Waldstr.
8	531	Podbielskistr. / Am Listholze
9	599	Podbielskistr. / Raffaelstr. / Raabenstr.
10	533	Podbielskistr. / Hermann-Bahlsen-Allee / Spannhagenstr.
11	537	Podbielskistr. / Klingerstr. / Eulenkamp
12	534	Walderseestr. / Hermann-Bahlsen-Allee
13	519	Lister Kirchweg / Bothfelder Str. / Karl-Kraut-Str.
14	536	Podbielskistr. / Grillparzerstr.
15	506	Wedekindstr. / Hohenzollernstr.
16	502	Celler Str. / Am Welfenplatz
17	524	Am Welfenplatz / Kriegerstr.
18	520	Ferdinand-Wallbrecht-Str. / Waldstr.
19	146	Zietenstr. / Isernhagener Str.
20	515	Dragonerstr. / Isernhagener Str.

Für die Knotenpunkte steht jeweils ein detaillierter Lageplan zur Verfügung. Dieser enthält die Detektorpositionen und -bezeichnungen, die als Grundlage für die Nachfragemodellierung in SUMO dienen. Abbildung 91 zeigt beispielhaft den Lageplan für den Knotenpunkt 1.

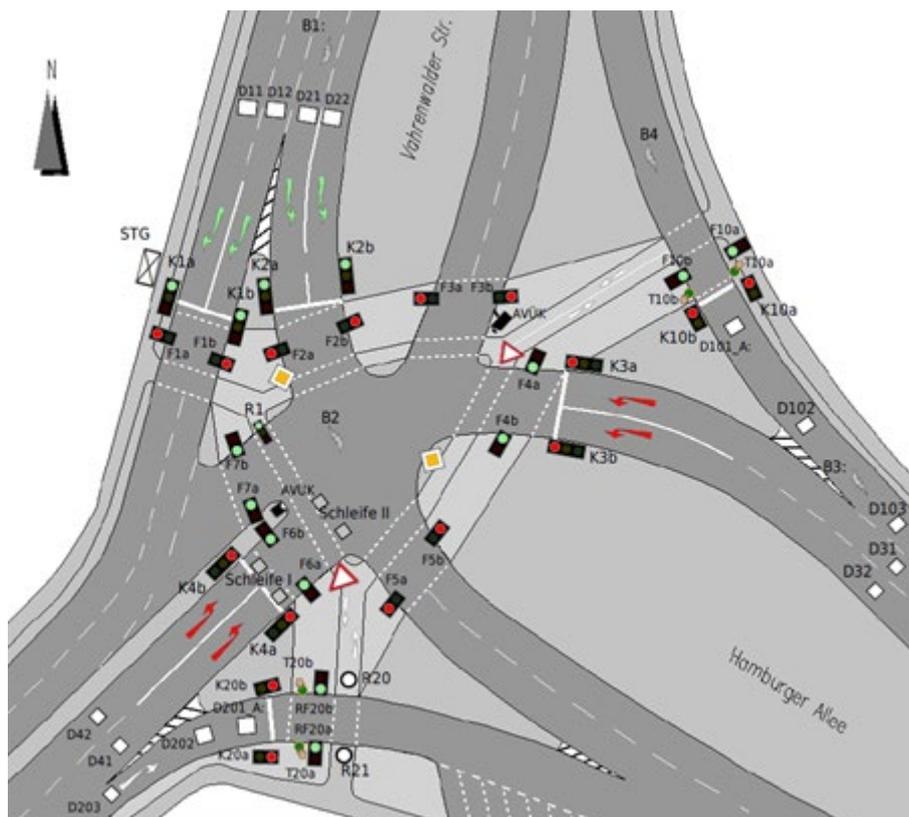


Abbildung 91: Lageplan für Knotenpunkt 1 - Vahrenwalder Str. / Hamburger Allee / Arndtstr.

Das Ziel der Kalibrierung war die Verkehrsnachfrage eines repräsentativen Werktags. Daher wurden bei der Datenaufbereitung ausschließlich die Tage Dienstag bis Donnerstag berücksichtigt, da Montage und Freitage durch Wochenendpendler abweichende Verkehrsmuster aufweisen. Des Weiteren wurden Feier- und Ferientage aussortiert. Abschließend wurde unter Verwendung von gängigen Methoden der Ganglinienanalyse eine Clusterung der Tagesganglinien durchgeführt, um die restlichen unpassenden Tagesmuster auszufiltern. Nicht repräsentative Tagesmuster könnten z.B. durch Messeveranstaltungen, Umleitungen durch Verkehrsunfälle, Evakuierungen, etc. verursacht worden sein.

Abbildung 92 zeigt die exemplarische Vorgehensweise für den Detektor D41 aus Knotenpunkt 1. Das erste Diagramm (Abbildung 92 oben links) zeigt alle Ganglinien aus dem gegebenen Zeitraum. Nach der Separierung der relevanten Wochentage (Dienstag - Donnerstag) ergibt sich das zweite Diagramm (Abbildung 92 oben rechts). Durch das Entfernen von Feier- und Ferientagen werden weitere Ganglinien ausgefiltert (Abbildung 92 unten links). In diesem Beispiel ist deutlich zu sehen, dass weiterhin eine Ganglinie enthalten ist, die vom typischen Tagesmuster abweicht. Um auch diese Abweichungen zu entfernen, wird schließlich eine Clusterung durchgeführt, wodurch Ganglinien mit ähnlichen Charakteristiken gruppiert werden. Die gruppierten Ganglinien, mit der größeren Anzahl an Ganglinien, werden schließlich aggregiert (Abbildung 92 unten rechts).

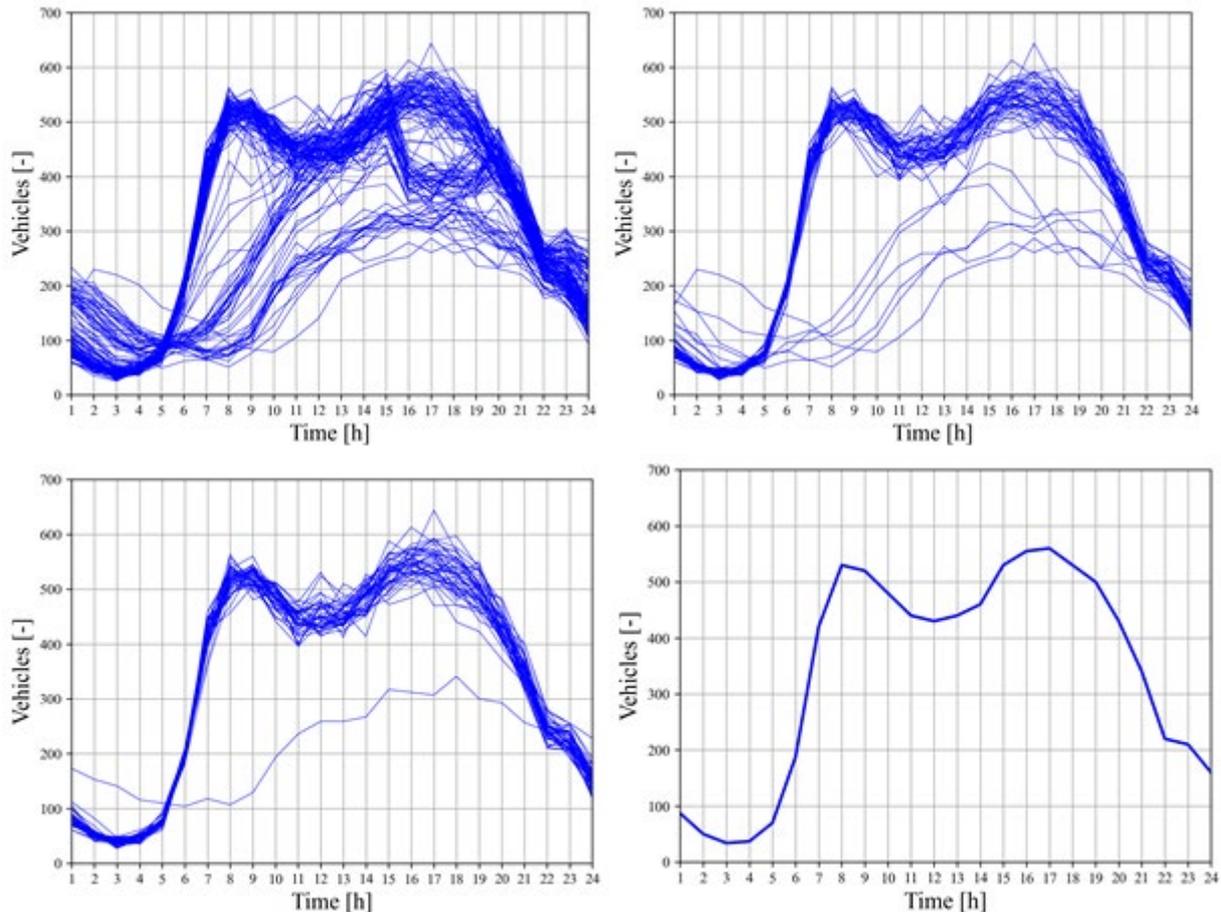


Abbildung 92: Exemplarische Datenaufbereitung für Knotenpunkt 1 Detektor 41. Oben links sind alle Detektordaten im gegebenen Zeitraum dargestellt. Die Filterung nach relevanten Wochentagen (Dienstag - Donnerstag) ergibt Ganglinien gemäß oben rechts. Nach Entfernen von Feiertagen verbleiben die Ganglinien zu sehen in unten links. Finale Ganglinie ist unten rechts zu sehen.

Nach abgeschlossener Datenaufbereitung liegen für alle Knotenpunkte und darin befindlichen Detektoren aufbereitete Ganglinien vor, die als Grundlage für die Verkehrsnachfrage in der Simulation dienen.

Kalibrierung des Fahrzeugfolgmodells

Das longitudinale Fahrverhalten der simulierten Fahrzeuge wird unter Verwendung empirischer Beschleunigungsprofile kalibriert. Hierfür wurde ein Kalibrierungsverfahren entwickelt, um einen geeigneten Parametersatz für das Fahrzeugfolgmodell zu ermitteln.

Abbildung 93 veranschaulicht den Kalibrierungsprozess für die iterative Optimierung, welche auf der Covariance Matrix Adaption Evolution Strategy (CMA-ES) beruht (Hansen & Ostermeier (2001)). Hierbei wird der Fehler zwischen den kumulativen Beschleunigungsverteilungen von Eingangsdaten und den generierten Simulationsergebnissen minimiert.

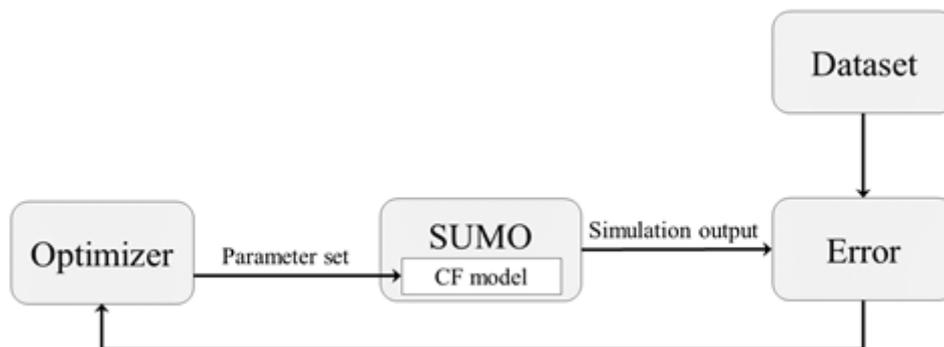


Abbildung 93: Kalibrierungsprozess für das longitudinale Fahrverhalten in SUMO.

Für die Ermittlung des Fehlers werden die Verteilungsfunktionen unter Verwendung des Kolmogorov-Smirnov Tests verglichen:

$$E = \sup_x |F(x) - G(x)|$$

Bei der Kalibrierung des konventionellen Fahrverhaltens wurden empirische Daten aus Fahrzeugfahrten im urbanen Raum verwendet. Abbildung 94 links zeigt das Resultat dieser Kalibrierung. Der Beschleunigungsbereich befindet sich etwa zwischen -2.5 und 2.5 m/s^2 . Der Lyft-Datensatz⁴ enthält laut Houston et al. (2020) Fahrzeug- und Umgebungsdaten, die während automatisierten Fahrten in städtischen Gebieten gesammelt wurden. Insgesamt umfasst der Datensatz 1118 Stunden Fahrzeit und eine Gesamtfahrstrecke von 26.344 km. Abbildung 94 rechts zeigt die Ergebnisse für die Kalibrierung des automatisierten Fahrzeugs basierend auf dem Datensatz. Die empirischen Beschleunigungswerte reichen hier von etwa -6 bis 6 m/s^2 .

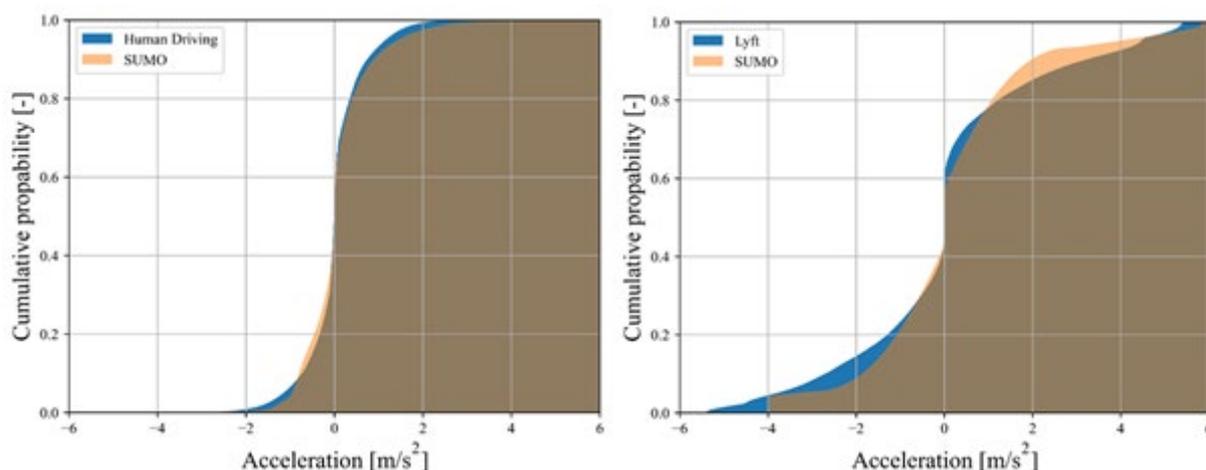


Abbildung 94: Ergebnisse der Kalibrierung für das konventionelle Fahrverhalten mit einer Abweichung von 4.6% (links) und das automatisierte Fahrverhalten mit einer Abweichung von 5.88% (rechts).

⁴ <https://autonomous.lyft.com/level5/data> |Stand: Dezember 2020

In der Kalibrierung des konventionellen Fahrverhaltens wurde eine Abweichung von 4.6% erzielt, wohingegen beim automatisierten Fahrverhalten eine etwas größere Abweichung von 5.88% erreicht wurde.

Für die Auslegung von unterschiedlichen Risiko-Konfigurationen wurden unterschiedliche Minimalabstände zum vorausfahrenden Fahrzeug sowie vereinzelt die maximale Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs konfiguriert. Tabelle 35: Risiko-Konfigurationen der automatisierten Fahrzeuge. fasst die verwendeten Konfigurationen zusammen.

Tabelle 35: Risiko-Konfigurationen der automatisierten Fahrzeuge.

Risiko-Konfiguration	Abstand im Stillstand	Zeitlicher Abstand	Max. Geschwindigkeit
Aggressive	0.5 m	0.5 s	-
Default	1.0 m	0.8 s	-
Defensive	1.5 m	1.0 s	-
Super Defensive	2.0 m	1.5 s	-
Super Defensive (SL)	2.0 m	1.5 s	40 km/h
Konventionell	1.5 m	1.0 s	-

5.5.2 Ergebnisse

Für die Untersuchung der Auswirkungen auf die Qualität des Verkehrsablaufs wurde zunächst die Fundamentaldiagramme für alle Kanten des Straßennetzes nach Van Aerde (1995) ausgewertet. Hierbei wurden alle netzweiten Kanten mit einer Mindestlänge von 100 m berücksichtigt. Durch Mittelung wurde ein Fundamentaldiagramm für das gesamte betrachtete Netz ermittelt, das für die Beurteilung der Systemleistungsfähigkeit herangezogen wird.

Bei Betrachtung des Fundamentaldiagramms für die Konfiguration „Aggressive“ ergeben sich die Diagramme in Abbildung 95. Dabei wurden für die automatisierten Fahrzeuge unterschiedliche Durchdringungsraten (20%, 40%, 60%, 80%, 100%) simuliert. Abbildung 95 links zeigt den Verkehrsfluss in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte. Es ist zu erkennen, dass die maximale Verkehrsdichte mit Erhöhung der Durchdringungsrate auf bis zu 160 Fzg./km steigt. Zugleich tritt der Scheitelpunkt bei einer geringeren Verkehrsdichte ein, wobei gleichzeitig der maximale Verkehrsfluss von ca. 1700 Fzg./h (bei rein konventionellen Fahrzeugen) auf ca. 1760 Fzg./h bei einer Durchdringungsrate von 100% steigt. Im mittleren Diagramm ist die Durchschnittsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Verkehrsfluss zu sehen. Mit steigendem Verkehrsfluss bleibt die Geschwindigkeit bei größerer Durchdringungsrate konstanter. Abbildung 95 rechts zeigt die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Verkehrsdichte. Mit steigender Durchdringungsrate resultiert eine ausgeprägtere kubische Charakteristik des Geschwindigkeitsprofils. Insgesamt ist das Integral bei anteiligen automatisierten Fahrzeugen stets größer als bei rein konventionellem Verkehr.

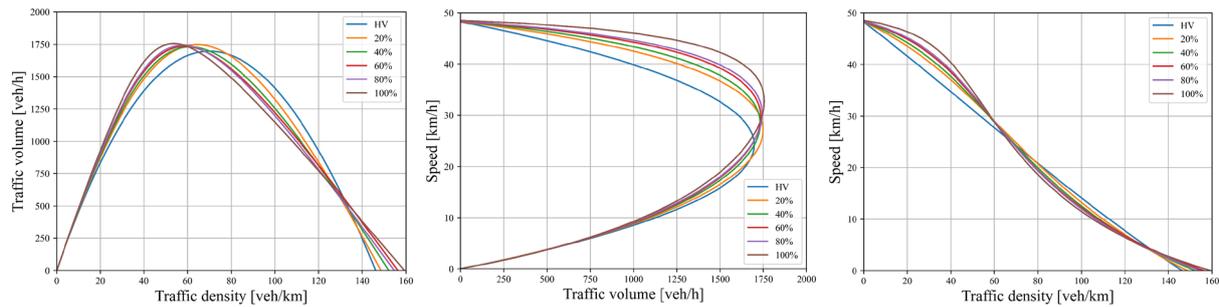


Abbildung 95: Fundamentaldiagramm für Risiko-Konfiguration „Aggressive“ im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen (HV) gemäß den Parametern in Tabelle 35: Risiko-Konfigurationen der automatisierten Fahrzeuge..

Abbildung 96 zeigt den Vergleich aller Konfigurationen (s. Tabelle 35) mit einer Durchdringungsrate von 100%. In Abbildung 96 links verschiebt sich der Scheitelpunkt ähnlich zu Abbildung 96 links mit steigender Risikoauslegung. Die maximale Verkehrsdichte ist bei den beiden „super-defensive“ Konfigurationen mit etwa 140 Fzg./km etwas geringer als bei den konventionellen Fahrzeugen (147 Fzg./km). Sowohl im Geschwindigkeits-Verkehrsfluss-Diagramm als auch im Geschwindigkeits-Verkehrsdichte-Diagramm (Abbildung 96 (Mitte & rechts)) wird die Maximalgeschwindigkeit der Konfiguration „super-defensive (SL)“ von 40 km/h deutlich. Darüber hinaus zeigt sich bei dem Verlauf der durchschnittlichen Geschwindigkeiten mit steigender Risikoauslegung eine flachere negative Steigung.

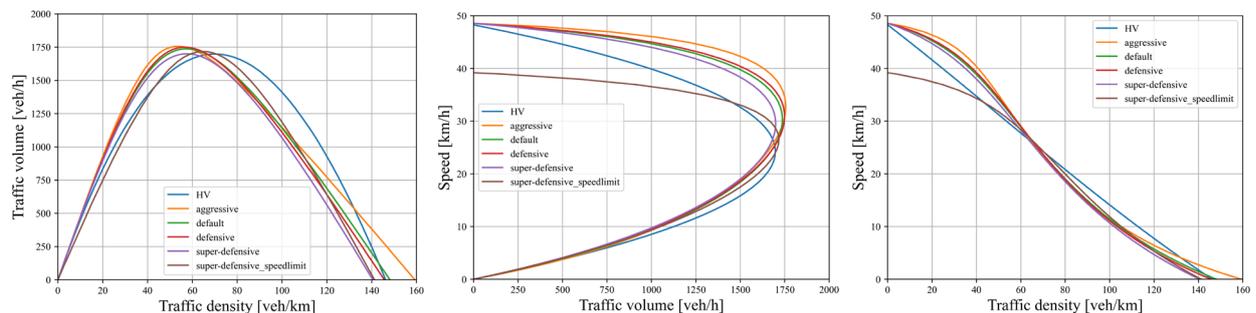


Abbildung 96: Fundamentaldiagramm für alle Risiko-Konfigurationen.

Bei der Untersuchung der Reisezeiten wurde festgestellt, dass alle Konfigurationen eine Verkürzung der durchschnittlichen Reisezeiten zur Folge haben. Abbildung 97 zeigt die prozentuale Reisezeitverkürzung in Relation zum konventionellen Fahren. Mit steigender Risikoauslegung sowie höherer Durchdringungsrate geht eine Verbesserung der durchschnittlichen Reisezeit einher. Eine Ausnahme ist bei den „super-defensive“ Konfigurationen für eine Durchdringungsrate von 20% zu sehen. Für die Konfiguration mit Geschwindigkeitslimitierung (SL) zeigt sich eine Verbesserung von etwa 20%, wohingegen ohne Geschwindigkeitslimitierung etwa 15% resultieren.

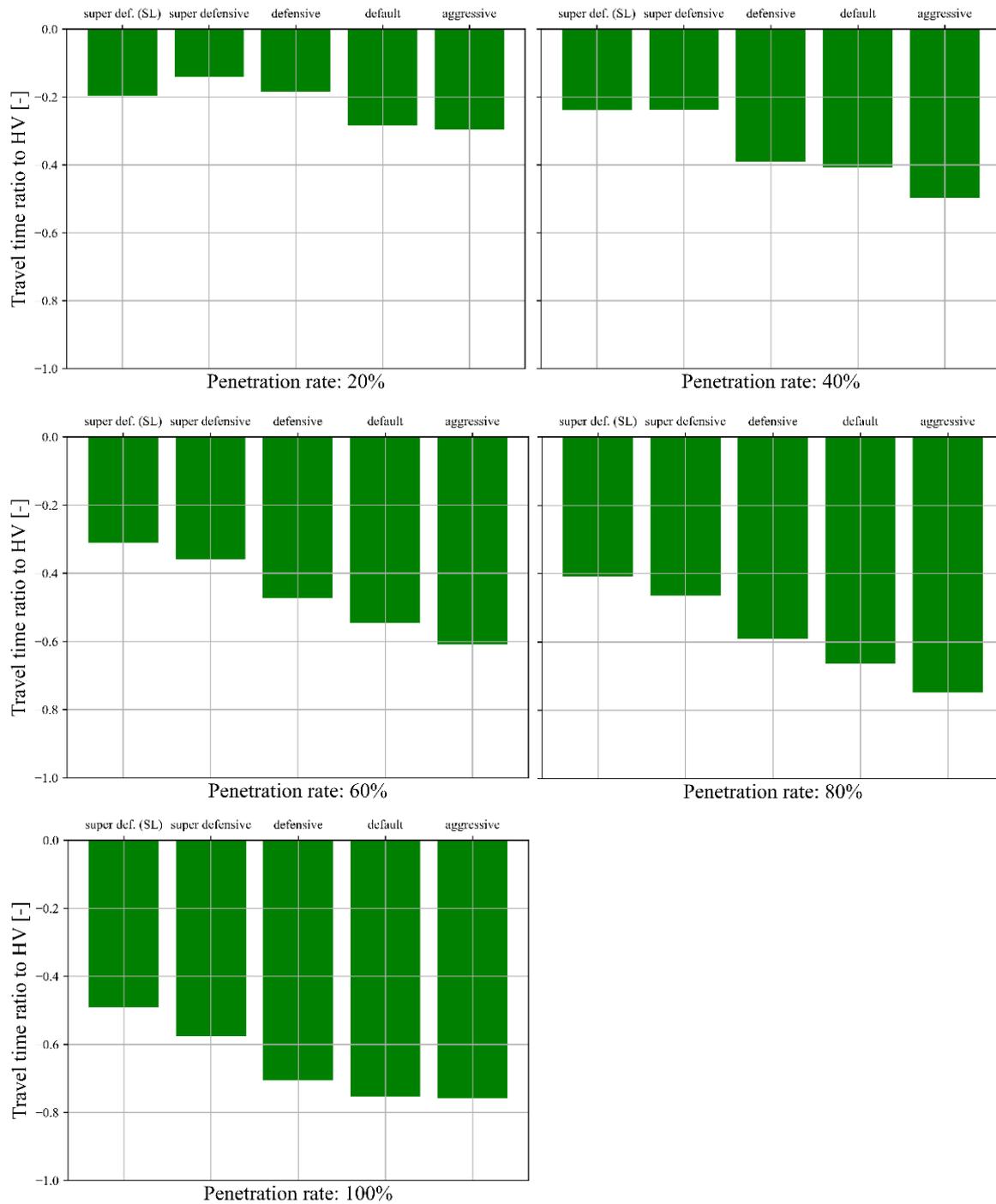


Abbildung 97: Reisezeitverbesserung in Relation zum konventionellen Fahren für unterschiedliche Durchdringungsraten.

5.5.3 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen insgesamt, dass mit steigendem Anteil automatisierter Fahrzeuge sowie einer höheren Risikoauslegung Verbesserungen der Verkehrsqualität erzielt werden.

Die Kapazität des betrachteten Verkehrsnetzes kann als Folge automatisierten Fahrens mit den für die Verkehrssimulation getroffenen Annahmen um etwa 4% gesteigert werden. Im Vergleich zu den Ergebnissen von Lu et al. (2020), die eine Steigerung der

maximalen Verkehrskapazität von etwa 16% ausweisen, fällt die Kapazitätssteigerung in dieser Untersuchung deutlich geringer aus.

Im Gegensatz hierzu werden deutliche Reisezeitverbesserungen von bis zu 75% erreicht, was auf die deutlich höheren Durchschnittsgeschwindigkeiten zurückzuführen ist. Diese wiederum werden durch die höheren Beschleunigungswerte erzielt, die auf Grundlage der zur Verfügung stehenden empirischen Daten kalibriert wurden (siehe Abbildung 94). Besonders städtische Verkehrsnetze verfügen über einen hohen Anteil an Knotenpunkten, was mit vermehrten Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen einhergeht. Durch die hohe netzweite Dichte an Knotenpunkten hat das schnellere Erreichen der Wunschgeschwindigkeiten unmittelbaren Einfluss auf die Reisezeiten.

Zusätzlich führen die erhöhten durchschnittlichen Reisezeiten zu einer geringeren Verkehrsdichte, d.h. einer geringeren Anzahl an Fahrzeugen, die sich gleichzeitig im betrachteten Straßennetz befinden, da die Zielpunkte schneller erreicht werden. Dies führt zu einer zusätzlichen Verbesserung der Reisezeiten, da Störungen im Verkehrsablauf reduziert werden.

5.6 Risikomaß (LUH)

5.6.1 Entwicklung eines mathematischen Modells für ein Risikomaß

Die Beurteilung des objektiven Risikos eines Verkehrsteilnehmers erfolgt nach ISO-Norm 31000:2018. Für den vorliegenden Fall wird das Risikomaß definiert als Produkt aus Kollisionswahrscheinlichkeit und zugehörigem Schadensausmaß:

$$\text{Risikomaß} = \text{Kollisionswahrscheinlichkeit} \times \text{Schadensausmaß}$$

Diese Definition gilt zunächst für einen Verkehrsteilnehmer zu einem festen Zeitpunkt. Anschließend werden die Ergebnisse über den gesamten Betrachtungszeitraum eines Verkehrsteilnehmers aggregiert. Das Risikomaß impliziert sowohl physische als auch psychische Schäden. Es wird anhand des aus den Probandenstudien ermittelten subjektiven Risikos justiert.

Kollisionswahrscheinlichkeit:

Die Kollisionswahrscheinlichkeit (in der Norm auch Schadenshäufigkeit) wird berechnet nach [Schreier 2016]⁵. Zum Zeitpunkt der Berechnung wird dabei für jeden Verkehrsteilnehmer prädiziert, mit welcher Wahrscheinlichkeit er sich in Zukunft wo aufhält (s.u.). Dies geschieht für einen festgelegten Zeitraum – den Prädiktionszeitraum. Zur Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit werden dann die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten der Verkehrsteilnehmer für den gesamten Prädiktionszeitraum überlagert. Die Kollisionswahrscheinlichkeit nimmt also mit der Länge des Prädiktionszeitraums zu.

⁵ Schreier, Matthias. *Bayesian environment representation, prediction, and criticality assessment for driver assistance systems*. Technische Universität Darmstadt, 2016.

Schreier trifft die vereinfachende Annahme, dass die Verkehrsteilnehmer während des Prädiktionszeitraums nicht mehr reagieren. Unter dieser Annahme können plausible Ergebnisse nur berechnet werden, wenn der Prädiktionszeitraum so kurz gewählt wird, dass eine Reaktion nicht mehr zu erwarten ist oder eine Kollision dann nicht mehr verhindern kann. Hier wird der zeitliche Horizont betrachtet, den ein Verkehrsteilnehmer benötigt, um im Falle einer Vollbremsung zum Stehen zu kommen. Dabei wird eine Reaktionszeit von einer Sekunde berücksichtigt.

Unter der Annahme, dass keine Reaktionen mehr erfolgen, sind mehrere potentielle Kollisionsgegner stochastisch unabhängig voneinander. Somit kann eine Gesamtkollisionswahrscheinlichkeit unkompliziert berechnet werden kann.

Prädiktion der Aufenthaltswahrscheinlichkeiten:

Für die Prädiktion des Verhaltens und somit auch des zukünftigen Aufenthaltsortes eines Verkehrsteilnehmers existieren unzählige Ansätze und Modelle verschiedenster Komplexität. Die Modelle können beispielsweise deterministisch oder stochastisch sein, sie können sich ausschließlich auf die Physik beziehen oder ein angenommenes Manöver mit einbeziehen. In [Xie 2017]⁶ wird ein Modell für Kraftfahrzeuge vorgestellt und weitere werden erwähnt. Ein Modell zur Fußgängerprädiktion findet sich in [Rehder 2018]⁷.

In AFiM wird ein deterministischer Ansatz verfolgt, der zunächst die wahrscheinlichste Trajektorie eines Verkehrsteilnehmers bestimmt. Diese ist entweder durch den Straßenverlauf gegeben oder wird anhand der beobachteten Vergangenheit durch Lagrange-Polynome prognostiziert. Anschließend werden die Geschwindigkeit des Teilnehmers und die Krümmung seiner Trajektorie mithilfe von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen variiert.

Um eine möglichst gute Übereinstimmung mit dem subjektiven Risiko zu erreichen, kann das Modell verfeinert bzw. erweitert werden: Beispielsweise sollten plötzliche Bewegungen zuvor unbewegter Verkehrsteilnehmer berücksichtigt werden.

Schadensausmaß:

In der Fachliteratur zu Verkehrsunfällen (vgl. [Johannsen 2013]⁸) wird unterschieden zwischen der Unfallschwere und der Unfallfolgeschwere. Die Unfallschwere wird beschrieben durch Unfallkenngrößen wie die Kollisionsgeschwindigkeit v_{Koll} , der Geschwindigkeitsänderung Δv oder *EES* (Equivalent Energy Speed). Die Unfallfolgeschwere repräsentiert Personen- und Sachschäden. Bei Personenschäden wird die Verletzungsschwere meist nach der AIS-Skala kategorisiert (siehe [Kramer 2009]⁹). Dort werden den AIS-Klassen auch monetäre Kosten zugeordnet, falls ein Vergleich mit Sachschäden nötig ist.

⁶ Xie, Guotao, et al. "Vehicle trajectory prediction by integrating physics-and maneuver-based approaches using interactive multiple models." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 65.7 (2017): 5999-6008.

⁷ Rehder, Eike, et al. "Pedestrian prediction by planning using deep neural networks." *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2018.

⁸ Johannsen, Heiko. *Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.

⁹ Kramer, Florian. *Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen: Biomechanik-Simulation-Sicherheit im Entwicklungsprozess*. Springer-Verlag, 2009.

Es existieren keine allgemeingültigen Formeln für den Zusammenhang zwischen Unfallschwere und Unfallfolgeschwere, da jeder Unfall ein Einzelfall ist und zu viele Faktoren Einfluss haben. Zu diesen Faktoren gehören nicht nur gerichtete Geschwindigkeiten und Massen, sondern unter vielen weiteren auch Typ und Größe eines Fahrzeugs sowie Größe und Konstitution der Personen. Je nach Unfalltyp korrelieren die Unfallfolgen dabei besser oder schlechter mit den verschiedenen Eingangsgrößen, die Verletzungsschwere bei Personenschäden jedoch am häufigsten mit der Energie, die beim Unfallstoß übertragen wird (vgl. [Ottensmeyer 1985]¹⁰, [Otte 98]¹¹, [Johannsen 2013]).

Daher wird für Personenschäden von leicht verletzlichen Verkehrsteilnehmern (engl. *vulnerable road users*, VRU) im Rahmen von AFiM die quadratische Geschwindigkeitsänderung $(\Delta v)^2$ beim Aufprall als Kriterium für das Schadenausmaß gewählt. Sachschäden sind bei VRUs nebensächlich und werden vernachlässigt. Δv wird mittels zweidimensionaler Stoßtheorie und Impulserhaltungssatz berechnet. Dabei wird angenommen, dass der Stoß in Richtung der Relativgeschwindigkeit stattfindet und vollplastisch mit Stoßziffer $k=0$ erfolgt.

Bei Unfällen von Kraftfahrzeugen wird ein Teil der kinetischen Energie in Verformungsenergie des Fahrzeugs umgewandelt. Nach [Ottensmeyer 1985] kann im Stadtverkehr unter idealisierten Bedingungen angenommen werden, dass 50% der Energie in die Verformung des Fahrzeugs geht und 50% auf die Insassen wirkt (dies gilt nicht für Motorräder). Daher wird der Personenschaden in Kraftfahrzeugen mit $\frac{1}{2} (\Delta v)^2$ approximiert. Es wird nur eine Person pro Fahrzeug berücksichtigt. Zusätzlicher Schutz durch Gurt und Airbag wird vernachlässigt. Sachschäden entsprechen dem Anteil der Verformungsenergie und werden somit qualitativ auch durch $\frac{1}{2} (\Delta v)^2$ beschrieben, quantitativ jedoch ebenso vernachlässigt.

Ein oberer Grenzwert aufgrund maximal tödlicher Verletzungen ist im Stadtverkehr nicht nötig. Der untere Grenzwert kann durch das subjektive Risiko justiert werden.

Aggregation:

Nach den oben beschriebenen Methoden kann das Risikomaß für einen Verkehrsteilnehmer zu einem bestimmten Zeitpunkt berechnet werden. Genauso können auch die Risiken für jeden Verkehrsteilnehmer zu jedem (diskreten) Zeitpunkt des Untersuchungszeitraums bestimmt werden, oder nur für automatisierte Fahrzeuge.

Um jedoch verschiedene Szenarien, beispielsweise mit unterschiedlich riskantem Verhalten eines automatisierten Fahrzeugs, vergleichen zu können, muss das Risiko über den Untersuchungszeitraum und für alle relevanten Verkehrsteilnehmer zusammengefasst bzw. aggregiert werden. Dazu können verschiedene statistische Verfahren und Kennzahlen benutzt werden (vgl. [Hempel 2008]¹²).

In AFiM genügt es, das Risiko auszuwerten, das durch automatisierte Fahrzeuge entsteht (siehe Implementierung unten). Zur Beurteilung des Risikos wird sowohl das

¹⁰ Ottensmeyer, Hans-Ulrich. "Einfluss der Geschwindigkeit auf das Unfallgeschehen im Straßenverkehr." *Unfall und Fahrzeugtechnik* 9 (1985): 1-8.

¹¹ Otte, D., Willeke, H., Chinn, B., Doyle, D., & Schuller, E. (1998). Anprallmechanismen von helmgeschuetzten Koepfen. Unfallstudie COST 327. *FORSCHUNGSHEFTE ZWEIRADSICHERHEIT*, (8).

¹² Hempel, M., & Offerhaus, J. (2008). Risikoaggregation als wichtiger Aspekt des Risikomanagements. In *Risikoaggregation in der Praxis* (pp. 3-13). Springer, Berlin, Heidelberg.

durchschnittliche Risiko wie auch ein globales Maximum bestimmt. So kann das Verhalten der automatisierten Fahrzeuge Pareto-optimiert werden.

Dieses Vorgehen ist hinreichend zur Optimierung dergleichen Verkehrssituation mit verschieden riskantem Verhalten. Zum Vergleich unterschiedlicher Situationen muss das Risikomaß unter anderem anhand der Verkehrsdichte gewichtet werden. Außerdem haben dann weitere Faktoren wie beispielsweise das Wetter, die Tageszeit, etc. Einfluss.

Implementierung:

Das oben beschriebene Modell zur Berechnung des Risikomaßes wurde in MODIS implementiert. Dazu sind mehrere Diskretisierungen notwendig. Zunächst wird die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zur Bestimmung des Aufenthalts durch eine Menge von Trajektorien ersetzt. Zur Überlagerung und Integration dieser wird zweifach diskretisiert: die Geometrie durch ein Raster von Zellen dynamischer Größe, die Zeit durch regelmäßige Zeitpunkte. Die sich ergebenden Aufenthalts- und Kollisionswahrscheinlichkeiten können visualisiert werden.

Da im Rahmen von AFiM nur das Risiko relevant ist, das durch automatisierte Fahrzeuge entsteht, wird nur dieses bestimmt und ausgewertet. Dazu zählt jedoch nicht nur das Risiko für das Fahrzeug selbst, sondern auch das Risiko eines potentiellen Kollisionsgegners. Daher wird die Summe dieser beiden Risiken begutachtet.

Die Implementierung des Modells ist nicht nur für in MODIS simulierte Szenarien einsetzbar. Es können auch externe Trajektorien importiert und bzgl. des Risikos ausgewertet werden.

5.6.2 Plausibilitätsüberprüfung

Die Implementierung des Risikomaßes soll in diesem Abschnitt einer qualitativen Überprüfung der Ergebnisse unterzogen werden. Dazu werden die Ergebnisse der beiden Pilotstudien des Instituts für Regelungstechnik verwendet. Hierfür werden die Trajektorien der Pilotstudien in MODIS überführt und die Berechnung des Risikomaßes durchgeführt. Anschließend wird das Ergebnis der Berechnung mit der subjektiven Einschätzung der jeweiligen Probanden verglichen. Anhand dieser Ergebnisse sollen die Parameterkonfiguration zur Risikoberechnung möglichst realitätsnah angepasst werden. Die Szenarien werden im Folgenden als Einmündungsszenario und als Hauptstraßenszenario bezeichnet. Die Trajektorien der Szenarien werden in Abschnitt 5.5 beschrieben.

Einmündungsszenario:

Die Abbildung 98 beschreibt die Ergebnisse der Risikoanalyse des Einmündungsszenarios. Dabei ist zu beachten, dass die X-Achse die verschiedenen Szenarien beschreibt. Bei der Beschriftung der Szenarien wurde folgender Schlüssel verwendet:

- HP: Haltepunktszenario
- 30: 30km/h des Egofahrzeugs vor Bremsbeginn
- 50: 50km/h des Egofahrzeugs vor Bremsbeginn
- ff: Vor dem Egofahrzeug quert ein Fahrradfahrer die Einmündung
- fg: Vor dem Egofahrzeug quert ein Fußgänger die Einmündung
- 1: Der Proband wurde aufgefordert einen „angenehmen“ Bremspunkt zu wählen
- 2: Der Proband wurde aufgefordert den letztmöglichen Bremspunkt zu wählen

Die Y-Achse zeigt das gemittelte Risiko des Egofahrzeugs über die gesamte Szenariendauer. Zum einen werden die Risikobewertungen jedes einzelnen Probanden dargestellt, zum anderen wurden die Ergebnisse pro Szenario gemittelt und mit der roten Funktionskurve über die Probandendaten gelegt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die 50km/h-Szenarien risikoreicher sind, als das gleiche Szenario mit gefahrenen 30km/h. Außerdem ist zu erkennen, dass die Szenarien, bei denen ein Fußgänger die Einmündung überquert, risikoreicher sind als bei einem Fahrradfahrer. Grund dafür ist das gemittelte Risiko, das in dieser Abbildung dargestellt wird. Der Fußgänger ist langsamer als der Fahrradfahrer und befindet sich daher länger vor dem Egofahrzeug, wohingegen der Fahrradfahrer schneller der riskanten Situation entflieht. Somit erkennt das Egofahrzeug bei einem Fußgänger über einen längeren Zeitraum hinweg ein Risiko, wodurch das gemittelte Risiko im Vergleich höher ausfällt. Letztlich ist auch zu erkennen, dass in den meisten Fällen die Szenarien, bei denen der Proband aufgefordert wurde letztmöglich mit der Bremsung zu beginnen, risikoreicher sind als bei dem Verwenden eines „angenehmen“ Bremsstartpunkts.

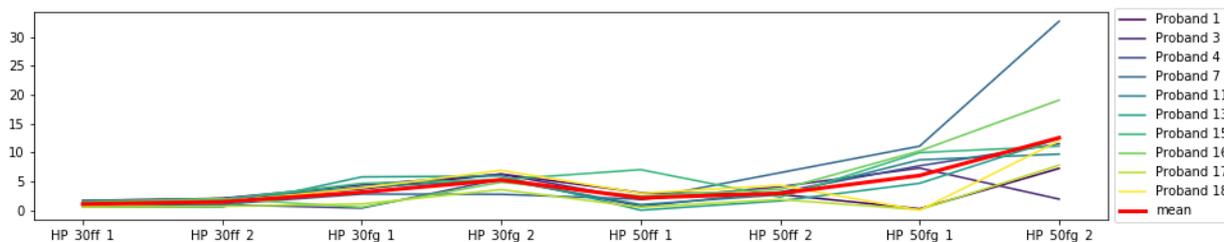


Abbildung 98: Risikoauswertung des Einmündungsszenarios der Pilotstudie. Risikoverhalten in verschiedenen Farben pro Proband. Durchschnittliches Risiko in Rot. Für Szenariendeclaration siehe Abschnitt 5.6.2

Hauptstraßenszenario:

In Abbildung 99 werden die Ergebnisse des Risikomaßes aus dem Hauptstraßenszenario verdeutlicht. Auch hier beschreibt die X-Achse die verschiedenen Szenarien. Bei der Beschriftung der Szenarien wurde folgender Schlüssel verwendet:

- AW: Ausweichszenario
- links: Das Egofahrzeug weicht in Fahrtrichtung nach links aus
- mitte: Das Egofahrzeug weicht nicht aus
- rechts: Das Egofahrzeug weicht in Fahrtrichtung nach rechts aus
- g: Mit Gegenverkehr
- og: Ohne Gegenverkehr

Die Y-Achse zeigt das gemittelte Risiko des Egofahrzeugs über die gesamte Szenariendauer. Zum einen werden die Risikobewertungen jedes einzelnen Probanden dargestellt, zum anderen wurden die Ergebnisse pro Szenario gemittelt und mit der roten Funktionskurve über die Probandendaten gelegt.

Die Ergebnisse zeigen, dass Szenarien mit der Existenz eines entgegenkommenden Fahrzeugs deutlich risikoreicher sind, also solche, bei denen das nicht der Fall ist. Die Ausweichrichtung des Egofahrzeugs ist in Bezug auf den Gegenverkehr entscheidend für den Risikowert. Das Risiko wird maximal, wenn das Egofahrzeug seine Trajektorie in Richtung des entgegenkommenden Fahrzeugs (links) verlegt. In den „og“-Szenarien, bei denen der Gegenverkehr nicht simuliert wurde, werden die Auswirkungen des Fußgängers auf dem Parkstreifen auf das Egofahrzeug verdeutlicht. Zahlenmäßig steigt

das Risiko, wenn das Egofahrzeug nach rechts ausweicht. Die Auswirkungen sind jedoch minimal. Grund dafür wird die vereinfachte Berechnung des Risikomaßes sein, bei der die möglichen Kurvenfahrten des Egofahrzeugs als zu unwahrscheinlich gelten, und daher eine Kollision mit dem Fußgänger in jedem Fall als äußerst unwahrscheinlich gilt.

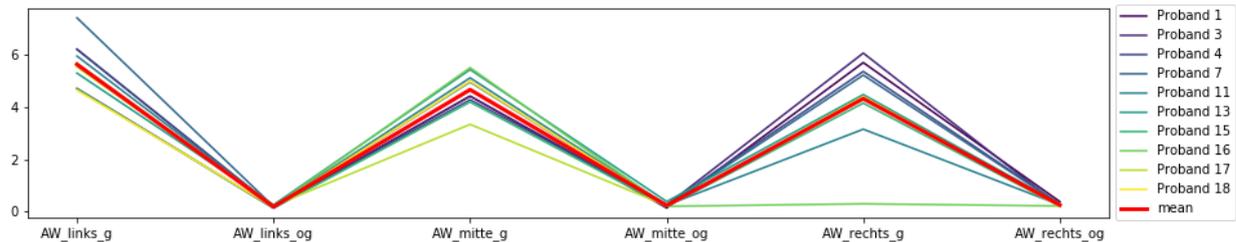


Abbildung 99: Risikoauswertung des Hauptstraßenszenarios der Pilotstudie. Risikoverhalten in versch. Farben pro Proband. Durchschnittliches Risiko in Rot.

Bei Proband 15 kam es beim Szenario „AW_rechts_g“ zu einer fehlerhaften Datenaufzeichnung, weshalb diese Daten bei der Auswertung nicht berücksichtigt wurden.

Anhand des Vergleiches der Ergebnisse der Risikoberechnung und mit zu den zu erwarteten Risiken in den einzelnen Szenarien durch die Probandendaten konnte das Risikomaß verfeinert werden. Die Ergebnisse des Risikomaßes gelten nicht als absolut kalibriert, sondern sind nur relativ zueinander zu interpretieren.

5.6.3 Risikoanalyse der SUMO-Großraumsimulation der List

Methodik

Um den Zusammenhang zwischen Risiko und Systemleistungsfähigkeit abschließend bewerten zu können, wurden die Ergebnisse der in Abschnitt 5.7.1 5.5 beschriebenen Verkehrsflusssimulation hinsichtlich des entwickelten Risikomaßes ausgewertet. Dabei wurde zwischen den fünf in Tabelle 35 aufgeführten Risikokonfigurationen unterschieden und Durchdringungsraten (PR) automatisierter Fahrzeuge zwischen 0 und 80 % in Schritten von 20 % untersucht, woraus sich insgesamt 21 Parameterkombinationen ergeben. Für die Auswertung hinsichtlich des Risikos wurde ein 60-minütiger Zeitraum von 11:00 - 12:00 Uhr betrachtet, da in diesem Zeitraum ca. 90 % der maximalen Verkehrsstärke der Tagesganglinie erreicht werden und dieser Zeitraum somit als repräsentativ für ein hohes Verkehrsaufkommen angenommen wird.

Weiterhin wird bei der Aggregation des Gesamtrisikos für ein Szenario davon ausgegangen, dass das Risiko durch technisches Versagen der automatisierten Fahrzeuge gegenüber dem durch das Fahrverhalten induzierten Unfallrisikos zu vernachlässigen ist. Daher wird die Ermittlung der Kollisionswahrscheinlichkeiten gemäß Abschnitt 5.8.1 zwar für alle Fahrzeuge im System durchgeführt, jedoch wird die Wahrscheinlichkeit für Kollisionen mit anderen automatisierten Fahrzeugen zu Null gesetzt. Dieses Vorgehen ermöglicht, das Risiko, das durch die mit den unterschiedlichen Risikokonfigurationen modellierte Verhaltensweisen entsteht, isoliert zu betrachten.

Ergebnisse

Das Ergebnis der Risikoanalyse besteht für jede der 21 betrachteten Kombinationen aus Risikokonfiguration und Durchdringungsraten in einem zeitlichen Verlauf des Risikos für

jedes der ca. 11.000 Fahrzeuge, das sich in der betrachteten Stunde im System aufhält. Um auf Grundlage dieser Datenmenge eine Aussage zum Gesamtrisiko einer Risikokonfiguration treffen zu können, müssen die Analyseergebnisse somit sinnvoll aggregiert werden. In diesem Abschnitt werden exemplarisch für die Aggregation Verteilungen der durchschnittlichen Risiken sowie eine Quantilbetrachtung gezeigt.

Der Einfluss der Durchdringungsrate lässt sich untersuchen, indem die Durchdringungsrate variiert wird, während die verwendete Risikokonfiguration beibehalten wird. **Abbildung 100** zeigt eine derartige Untersuchung für die Risikokonfiguration *default*. Die Grafik zeigt ein Histogramm der Verteilungen des durchschnittlichen Risikos jedes Verkehrsteilnehmers. Es wird ersichtlich, dass sich der Schwerpunkt der Histogramme trotz gleichbleibenden Fahrverhaltens der automatisierten Fahrzeuge mit steigender Durchdringungsrate in Richtung eines geringeren durchschnittlichen Risikos bewegt. Dieser Effekt ist auf die im vorigen Absatz beschriebene Beschränkung zurückzuführen und lässt sich als eine Verringerung des Risikos durch menschliches Fehlverhalten bei höheren Durchdringungsraten interpretieren.

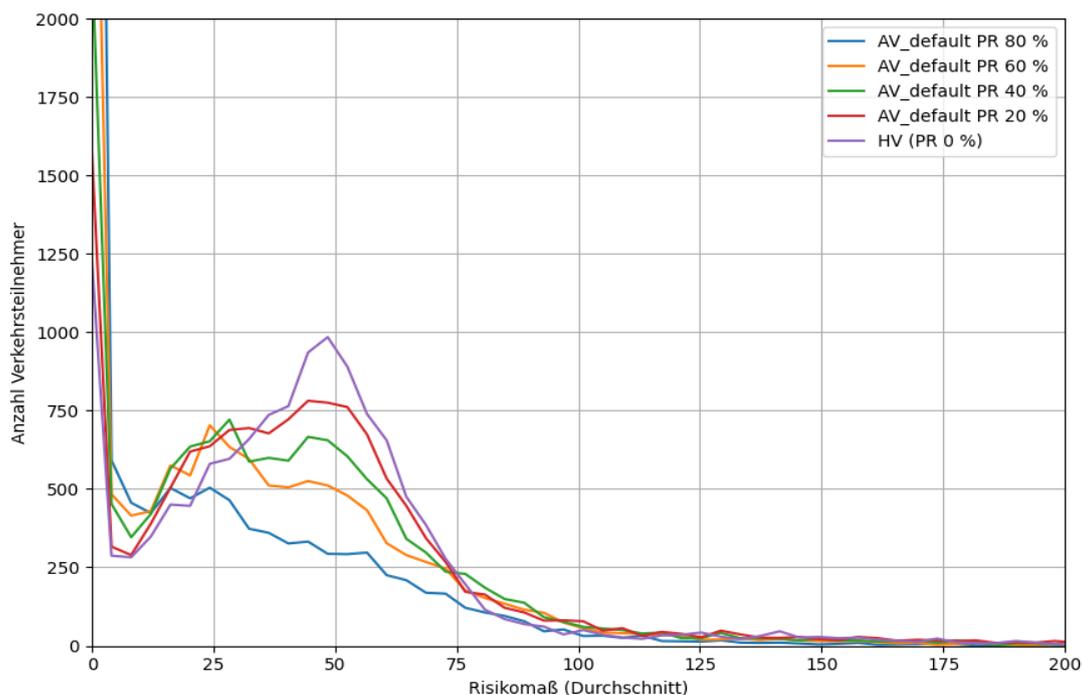


Abbildung 100: Verteilungen des durchschnittlichen Risikos über alle Verkehrsteilnehmer im Szenario in Abhängigkeit von der Durchdringungsrate, exemplarisch für die Risikokonfiguration *default*.

Werden verschiedene Risikokonfigurationen bei gleicher Durchdringungsrate gegenübergestellt, lässt sich der Einfluss des simulierten Fahrverhaltens darstellen. **Abbildung 101** zeigt eine derartige Gegenüberstellung der Verteilungen des durchschnittlichen Risikos exemplarisch für eine Durchdringungsrate von 60 %.

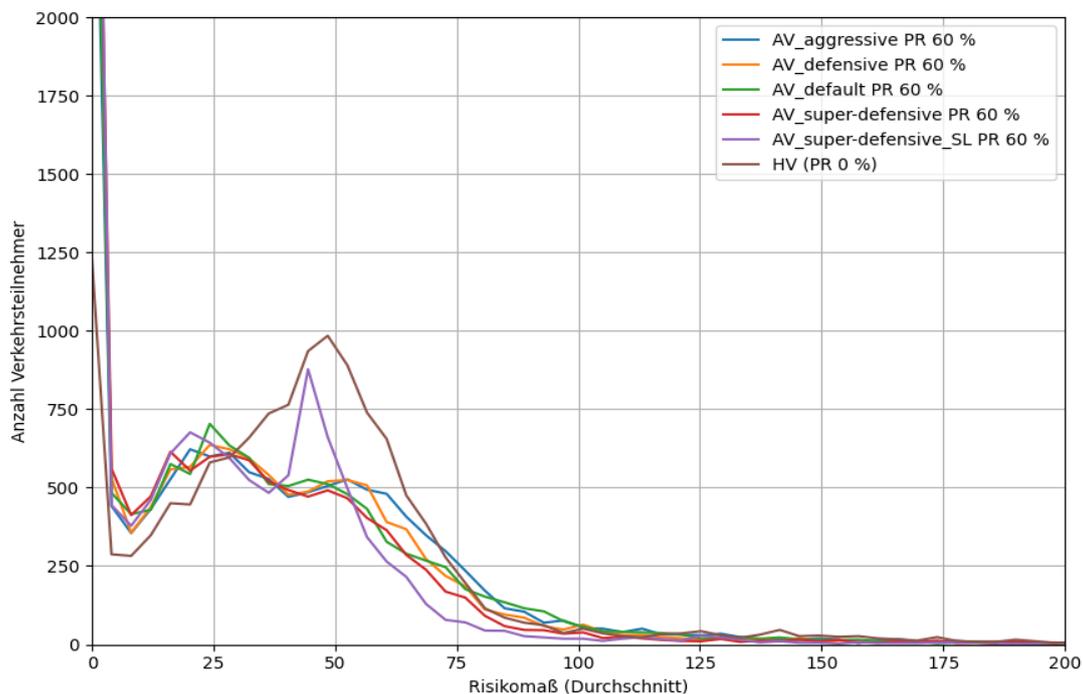


Abbildung 101: Verteilungen des durchschnittlichen Risikos über alle Verkehrsteilnehmer im Szenario in Abhängigkeit der Risikokonfiguration, exemplarisch für die Durchdringungsrate 60 %.

Die gezeigten Verteilungen geben zwar einen guten visuellen Eindruck über den Zusammenhang zwischen Risiko und Risikokonfiguration, für eine direkte Gegenüberstellung mit der Systemleistungsfähigkeit ist jedoch eine Reduzierung auf einen skalaren Wert je untersuchter Kombination aus Risikokonfiguration und Durchdringungsrate wünschenswert. Ein solcher skalarer Wert lässt sich durch die Betrachtung von Quantilen ermitteln.

Abbildung 102 zeigt verschiedene inverse Verteilungsfunktionen des zeitabhängigen Risikos aller Verkehrsteilnehmer einer Untersuchung. Die inverse Verteilungsfunktion beschreibt, welches Risiko von dem auf der x-Achse aufgetragenen Anteil der Aufenthaltszeit aller Fahrzeuge während einer Untersuchung nicht überschritten wird. Es wurde bewusst die inverse Darstellung ausgewählt, da eine auf der y-Achse „höhere“ Kurve dabei gleichbedeutend mit einem höheren Risiko ist. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde die Darstellung auf einige exemplarische Kurven beschränkt.

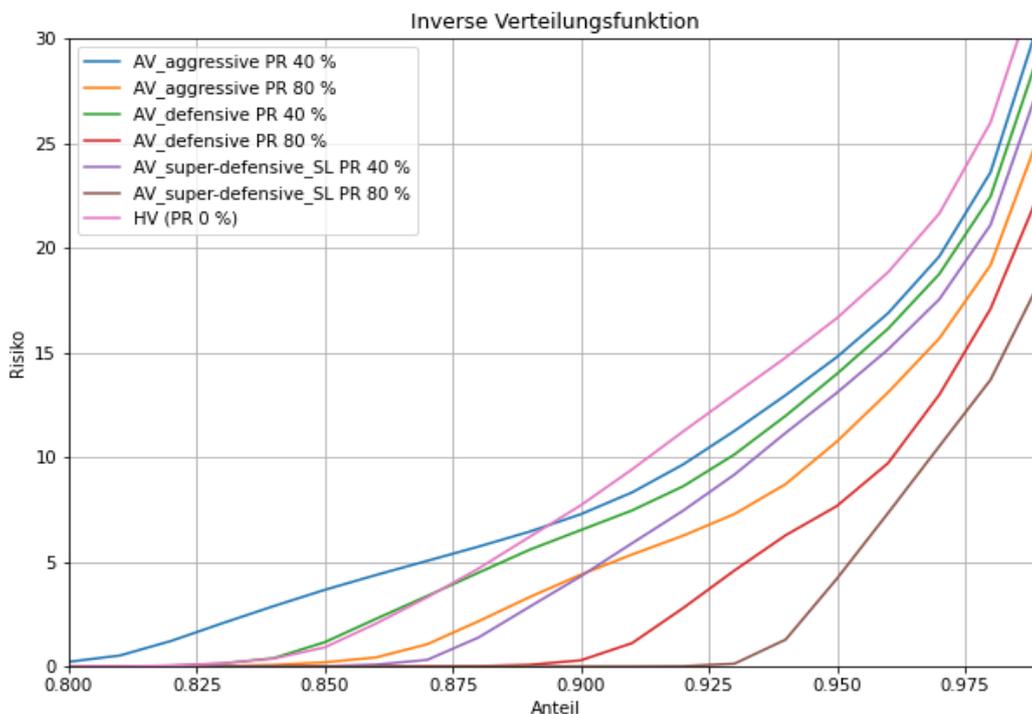


Abbildung 102: Ausschnitt der inversen Verteilungsfunktion für exemplarische Kombinationen aus Risiko-Konfiguration und Durchdringungsrate.

Mit Hilfe der Verteilungsfunktion lassen sich nun Quantile bestimmen. Diese beschreiben, welches Risiko während eines festgelegten zeitlichen Anteils der Aufenthaltszeit nicht überschritten wird. Für die folgenden Untersuchungen zum Zusammenhang mit der Systemleistungsfähigkeit wurde das 95 %-Quantil gewählt. Die entsprechenden Zahlenwerte sind für alle untersuchten Konfigurationen in Tabelle 36 aufgeführt, wobei eine Normierung auf das Risiko für das konventionelle, rein menschliche Fahrverhalten vorgenommen wurde.

Tabelle 36: Übersicht über die 95 %-Risikoquantile aller untersuchten Risiko-Konfigurationen und Durchdringungsraten der automatisierten Fahrzeuge, normiert auf das vollständig menschliche Fahrverhalten (PR 0 %).

Durchdringungsrate (PR)	0 %	20 %	40 %	60 %	80 %
Risiko-Konfiguration					
Aggressive	1,0	0,98	0,89	0,86	0,65
Default	-*	0,92	0,88	0,72	0,49
Defensive	-*	0,95	0,84	0,74	0,46
Super Defensive	-*	0,94	0,83	0,65	0,34
Super Defensive (SL)	-*	0,95	0,79	0,70	0,25

*PR 0 % entspricht 100 % menschlichen Fahrern. Somit ist das Risiko unabhängig von der Riskokonfiguration und wird daher nur einmal aufgeführt.

5.6.4 Zusammenfassung

Zusammenfassung

Es wurde ein Risikomaß entwickelt, das auf Grundlage einer Bewegungsextrapolation konzeptuell in der Lage ist, ein aktuelles Risikolevel sowohl „live“ während einer Simulation oder einer Testfahrt zu bestimmen als auch gefahrene Trajektorien im Nachhinein rückwirkend über ihren zeitlichen Verlauf zu bewerten.

Das Risikomaß konnte zunächst durch Abgleich mit den Probandenstudien aus dem weiteren Projektverlauf qualitativ auf Plausibilität überprüft werden. Anschließend wurde das ermittelte Risikomaß verwendet, um die Simulationsergebnisse einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation bewerten zu können. Auch bei dieser Bewertung konnten plausible Ergebnisse erzielt werden.

Ausblick

Während sich selbst bei der größten untersuchten Durchdringungsrate von 80 % die Wechselwirkung von automatisiertem und menschlichem Fahrverhalten noch deutlich im ermittelten Risiko niederschlägt (siehe letzte Spalte in Tabelle 36), führt die Annahme bei der Auswertung der Großraumsimulation, lediglich das Risiko menschlichen Fehlverhaltens zu bewerten, dazu, dass eine Durchdringungsrate automatisierter Fahrzeuge von 100 % unabhängig von der Risiko-Konfiguration ein Nullrisiko ergibt. Weitergehende Forschung an der objektiven Risikobewertung sollte sich somit auch mit diesem Grenzfall befassen, um ein sinnvolles Risiko auch für vollständig automatisiertes Fahren ermitteln zu können.

Darüber hinaus konnte, obwohl das Schadensausmaß einer physikalisch motivierten Modellierung folgt, wie beschrieben dem Absolutwert des Schadens und somit auch des resultierenden Risikos bisher keine eindeutige Interpretation zugeordnet werden. In der bestehenden Form eignet sich das Risikomaß somit ausschließlich zum relativen Vergleich ähnlicher Konfigurationen. Während dies für die Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts, in dem der „Status Quo“ mit einer prognostizierten steigenden Durchdringungsrate automatisierter Fahrzeuge verglichen wurde, vollständig zielführend ist, wäre eine absolute Interpretierbarkeit für eine zukünftige praktische Anwendbarkeit des Risikomaßes durchaus wünschenswert.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Erlebtes Risiko von Mitfahrern automatisierter Fahrzeuge und schwächeren Verkehrsteilnehmern (TUBS)

In zwei Pilotstudien, einer Fahrsimulatorstudie und einer Online-Studie wurde das erlebte Risiko menschlicher Verkehrsteilnehmer im Umgang mit hochautomatisierten Fahrzeugen in zwei häufig vorkommenden, dyadischen Interaktionssituationen im urbanen Mischverkehr untersucht, eine Fahrt auf einer geraden Strecke mit Präsenz eines Fußgängers, der möglicherweise die Straße queren wird und bei einer Einmündung, bei der Fußgänger bzw. Radfahrer die Straße bei der Anfahrt des automatisierten Fahrzeugs queren.

In der Fahrsimulatorstudie lag der Fokus auf der Innensicht eines Mitfahrers im hochautomatisierten Fahrzeug, welches auf einer geraden Hauptstraße fährt und mit einem Fußgänger auf dem seitlichen Parkstand interagiert. Dabei wurden sowohl das Fahrverhalten des automatisierten Fahrzeugs (Geschwindigkeit, lateraler Versatz im eigenen Fahrstreifen), als auch die Fahrumgebung (Gegenverkehr, Fußgängerpräsenz) variiert, sodass Mitfahrer eine ganze Bandbreite an Variationen der Fahrsituation und mögliche Reaktionen des automatisierten Fahrzeugs auf die Fahrumgebung erlebten. Für jede Variation der Fahrsituation wurde das erlebte Risiko und das Komforterleben des Mitfahrers untersucht. Auf Basis dieser Bewertungen wurden Empfehlungen für die Anpassung der automatisierten Fahrfunktion gegeben.

In der Onlinestudie wurde die Interaktion menschlicher Verkehrsteilnehmer mit einem hochautomatisierten Fahrzeug an einer Einmündung untersucht. Im Unterschied zur ersten Studie wurden hier sowohl die Innensicht eines Mitfahrers, als auch die Außensicht schwächerer Verkehrsteilnehmer (Fußgänger, Radfahrer) einbezogen, und miteinander verglichen. Zusätzlich wurden die Richtung, aus der sich ein schwächerer Verkehrsteilnehmer der Einmündung nähert sowie die Anfahrtgeschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs variiert. Im Rahmen dieser Studie wurde untersucht, wann ein automatisiertes Fahrzeug idealerweise bzw. spätestens beginnen soll, zu bremsen, damit sich alle beteiligten menschlichen Verkehrsteilnehmer im Umgang mit diesem Fahrzeug sicher fühlen. Dazu hatten Probanden die Aufgabe, den Bremsbeginn zu beiden Zeitpunkten selbst einzustellen.

Über beide Studien hinweg ergaben sich zusammenfassend Antworten zu diesen Fragen:

- In der Interaktion mit einem hochautomatisierten Fahrzeug wollen menschliche Verkehrsteilnehmer (Mitfahrer, Fußgänger, Radfahrer) kein erwartetes Risiko eingehen. Stattdessen zeigt die Onlinestudie, dass menschliche Verkehrsteilnehmer die Interaktion mit dem Fahrzeug höchstens als unangenehm, idealerweise aber als harmlos erleben wollen. Das trifft unabhängig von der Innen- und Außensicht auf alle Verkehrsteilnehmer zu. Analog bewerteten die Mitfahrer die erlebten Fahrverhaltensweisen in der Fahrsimulatorstudie zwischen harmlos und sehr unangenehm, in wenigen Ausnahmen auch als gefährlich, wobei sich das ideale, automatisierte Fahrverhalten bei der manuellen Fahrt im zweiten Studienteil den weniger unangenehmen Varianten aus dem ersten Studienteil entsprach. Somit zeigt sich auch hier, dass Mitfahrer kein Risiko erleben möchten.
- In beiden Interaktionssituationen wollen Verkehrsteilnehmer eine frühzeitige Rückmeldung, dass das automatisierte System die einzelnen,

handlungsrelevanten Komponenten in der Fahrumgebung (z.B. Gegenverkehr in Studie 1, kreuzende Verkehrsteilnehmer in Studie 2) erkennt, richtig einordnet, und angemessen darauf reagiert. Die Anpassung der Trajektorie erweist sich dabei unmittelbarer, fahrzeugseitiger Hinweis darauf und ist in Abhängigkeit von der Fahrsituation verschieden. So passte das automatisierte Fahrzeug seine Trajektorie in Studie 1 an, indem es einen lateralen Versatz nach links aufbaute und/ oder kurz vor der Fußgängerin abbremste. In Studie 2 bestand diese Anpassung in einem frühzeitigen Abbremsen.

- Eine fahrzeugseitige Anpassung der Trajektorie als Reaktion auf die Fahrumgebung kann eine sinnvolle Ergänzung zu einer Außenkennzeichnung bzw. einer internen Fahreranzeige sein.

Zusammenfassend zeigen beiden Studien, dass sich Mitfahrer und schwächere Verkehrsteilnehmer eine an die Fahrsituation angepasste, defensive Fahrweise eines automatisierten Fahrzeugs im urbanen Mischverkehr wünschen. Darüber hinaus möchten menschliche Verkehrsteilnehmer eine Rückmeldung darüber, dass es die Fahrsituation als Ganzes versteht, und flexibel auf Besonderheiten in der Fahrumgebung reagiert. Dieses kann durch das Fahrverhalten bzw. durch die Anpassung dessen, erreicht werden. Insgesamt könnte dieses vorausschauende Fahrverhalten dazu beitragen, die Akzeptanz hochautomatisierter Fahrzeuge bei Einführung in den urbanen Raum zu erhöhen, damit sich Menschen einerseits gerne automatisiert fahren lassen, und andererseits den Umgang mit diesen Fahrzeugen als positiv bewerten.

Zusammenfassend zeigt sich studienübergreifend, dass menschliche Verkehrsteilnehmer in der Interaktion mit einem hochautomatisierten Fahrzeug menschliche Verkehrsteilnehmer (Mitfahrer, Fußgänger, Radfahrer) kein erwartetes Risiko eingehen. Vielmehr sind menschliche Verkehrsteilnehmer bestrebt, harmlose oder höchstens unangenehme, aber keine gefährlichen Interaktionen im urbanen Mischverkehr zu erleben.

Dabei bestätigt die Realfahrtstudie im Vehicle-in-the-Loop die vorherigen Ergebnisse aus den Online- und Fahrstudien. Gleichzeitig waren die gefundenen Effekte in der Realfahrtstudie kleiner, was auf Artefakte im Fahrzeugverhalten zurückzuführen ist.

In der verkehrspsychologischen Debatte um das erlebte Risiko im Straßenverkehr liefern die berichteten Studien einen Beitrag zur Übertragung dieser Frage auf den (urbanen) Mischverkehr, d.h. auf die Interaktion menschlicher Verkehrsteilnehmer mit hochautomatisierten Fahrzeugen. Die gewonnenen Erkenntnisse stützen dabei vor allem die Annahme der *Zero Risk Theory* (Näätänen & Summala, 1974, 1976; Summala, 1988), welche im Kern von einer Optimierung des Risikoerlebens im Sinne einer Vermeidung von Risikoerleben ausgeht. Entsprechend wünschen sich sowohl Mitfahrer als auch schwächere Verkehrsteilnehmer in der Umgebung des hochautomatisierten Fahrzeugs eine frühe Reaktion des Fahrzeugs auf seine Fahrumgebung.

6.2 Systemleistungsfähigkeit im Mischverkehr mit automatisierten Fahrzeugen und relatives objektives Risiko (TUBS & LUH)

Für die Bewertung der Systemleistungsfähigkeit bei Mischverkehr mit automatisierten Fahrzeugen wurden fünf verschiedene Fahrstrategien automatisierter Fahrzeuge definiert, um die Sensitivität der Verkehrsnetze auf ein Spektrum unterschiedlicher Festlegungen von zeitlichen und räumlichen Mindestabständen sowie

Höchstgeschwindigkeiten automatisierter Fahrzeuge prüfen zu können. Die fünf ausgewählten Fahrstrategien repräsentieren ein Fahrverhalten, das von „sehr defensiv + Höchstgeschwindigkeit 40 km/h“ bis zu „aggressiv“ reichen und die mit einer Strategie für konventionellen Kraftfahrzeugverkehr verglichen wurden.

Die Bewertung wurde experimentiell für ein repräsentatives Straßennetz mit Hilfe einer für automatisierten Verkehr kalibrierten Verkehrsflusssimulation durchgeführt. Als Bewertungsgrößen wurden die in diesem Straßennetz gemittelte Kapazität sowie die Verhältnisse der Gesamtreisezeit herangezogen. Die in der Simulation für das ausgewählte Straßennetz eingesetzte Verkehrsnachfrage entsprach den in verschiedenen Verkehrszählungen gemessenen Werten und damit einem mittleren, nicht hoch ausgelasteten Nachfrageszenario.

Die Ergebnisse Verkehrsflusssimulation sind in sich konsistent und plausibel. Sie zeigen für abnehmende Abstände bei automatisierten Fahrzeugen sowohl eine Steigerung der Kapazität wie auch eine Reduzierung der Gesamtreisezeiten. Gegenüber dem Szenario mit ausschließlich konventionellen Fahrzeugen werden in allen Szenarien mit gemischt automatisiertem Verkehr bessere Bewertungen erzielt. In diese Logik passen auch die Veränderungen, die mit einer Erhöhung der Durchdringungsrate automatisierter Fahrzeuge einhergeht. Je höher deren Anteil an der gesamten Flotte ist, desto höher ist die Kapazität und desto geringer ist die Gesamtreisezeit aller Fahrzeuge.

Die Auswirkungen auf die Kapazität sind für alle Szenarien allerdings nicht sehr ausgeprägt. Insbesondere wird deutlich, dass in den Szenarien mit reduzierter Höchstgeschwindigkeit von 40 km/h die Kapazität kaum unter den Werten risikoorientierteren Szenarien liegt. Deutlicher sind die Unterschiede in den Verhältnissen Gesamtreisezeit. Je nach Ausstattungsrate und Fahrstrategie konnte eine Reduktion der Gesamtreisezeit zwischen 15% und 75% erreicht werden. Auch bei einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 40 km/h und defensiver Fahrstrategie kann durch die Automatisierung ein Vorteil bei der Reisezeit erzielt werden.

Das objektive, inhärente Risiko einer Kollision zwischen automatisiertem und konventionellem Fahrzeug wurde mikroskopisch für alle während einer Stunde aufgetretenen Interaktionen zwischen den Fahrzeugen ermittelt. Der Vergleich zwischen den insgesamt 21 Szenarien erfolgt über einen auf den derzeitigen Verkehr normierten Verhältniswert (95%-Risikoquantile). Für alle Szenarien mit automatisierten Fahrzeugen ergibt sich im Experiment gegenüber dem konventionellen Verkehr eine Reduktion des Risikowertes. Während jedoch bei aggressiverer Fahrstrategie und geringer Durchdringungsrate das Risiko kaum reduziert wird, werden bei hohen Ausstattungsraten und defensiver Fahrweise signifikante Verbesserungen erreicht. Die maximal festgestellte Risikoreduktion beträgt 75% bei sehr defensiv eingestellter Fahrstrategie in Verbindung mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung auf 40 km/h.

Im Experiment weisen alle Szenarien mit automatisierten Fahrzeugen Vorteile sowohl bei der Systemleistungsfähigkeit als auch für das objektive Risiko auf. Insbesondere zeigen die Ergebnisse, dass die Kapazität eines Straßennetzes auch bei einer sehr defensiven Fahrstrategie automatisierter Fahrzeuge immer noch über den heute erreichbaren Werten liegt, gleichzeitig dabei aber die Reisezeiten und vor allem das objektive Risiko signifikant reduziert werden können.

Die Ergebnisse zur Systemleistungsfähigkeit und zum objektiven Risiko unterliegen den Begrenzungen der Szenarienbildung und der Möglichkeiten der Kalibrierung automatisierten Fahrens im Modell. Daraus ergeben sich eine Reihe von Einschränkungen für deren Generalisierbarkeit. Insofern gelten die hier vorgestellten

Ergebnisse lediglich für die in dieser Untersuchung getroffenen Annahmen und können damit nur als Orientierung für die Auswirkungen verschiedener Strategien automatisierten Fahrens im Mischverkehr und deren Wechselwirkungen mit dem Risiko dienen.

7 Verwertung der Forschungsergebnisse

7.1 Wissenschaftliche Verwertung

Der Wissens- und Entwicklungsstand unabhängiger Forschung wird in gesellschaftlich relevanten Bereichen erweitert, weil das Zusammenspiel von automatisierten Fahrzeugen und anderen Verkehrsteilnehmern im öffentlichen Straßenraum als ein wichtiges Thema für den Verkehr der Zukunft und seine gesellschaftliche Akzeptanz angesehen wird. Die im Projekt AFiM gewonnenen Erkenntnisse bieten eine Grundlage für zukünftige Forschung und Anschlussprojekte und werden unmittelbar in Lehrveranstaltungen der lehrenden Institute einfließen. Damit wird eine an der aktuellen Forschung orientierte akademische Ausbildung gewährleistet. In verschiedenen Gremien der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften sowie dem Runden Tisch „Automatisiertes und vernetztes Fahren“ des BMVI vertreten die Verbundpartner ihre Projektergebnisse. Zudem sind Vorträge auf führenden nationalen und internationalen Konferenzen geplant.

7.2 Wirtschaftliche Verwertung

Die Projektpartner streben keine wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse an.

8 Anhang A

8.1 Probandenstudien: Instruktionen

8.1.1 AP 4400: Instruktion Befragungsmethodik Mitfahrer

Liebe Teilnehmer*in,

vielen Dank für Ihre Unterstützung bei unserem Versuch.

Im Stadtverkehr bewegen sich neben motorisierten Verkehrsteilnehmern (z.B. Autos, Zweiräder) auch nicht-motorisierte Verkehrsteilnehmer (z.B. Fußgänger, Fahrradfahrer).

Ziel des Versuchs ist es, die Begegnung von automatisierten Fahrzeugen mit Fahrradfahrern aus der Perspektive einer Passagier*in im automatisierten Fahrzeug zu untersuchen. Ihre Aufgabe in diesem Versuch ist es, die Begegnung mit einem Fahrrad an einer Einmündung zu bewerten.

Dazu werden Sie im Simulator ein Szenario sehen, in dem Sie sich in einem selbstfahrenden Fahrzeug befinden. Dieses Fahrzeug fährt auf eine Einmündung zu, die von einem Fahrrad gekreuzt wird.

Setzen Sie sich bitte auf den Fahrersitz. **Das automatisierte System übernimmt die Fahraufgabe vollständig. Sie müssen und können nicht eingreifen.** Beobachten Sie das Fahrverhalten des Fahrzeugs, in dem Sie sitzen, genau.

Im Anschluss werden Sie zur Situation befragt.

Insgesamt werden Sie 12 Situationen erleben.

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

8.1.2 AP 4400: Instruktion Befragungsmethodik Radfahrer

Liebe Teilnehmer*in,

vielen Dank für Ihre Unterstützung bei unserem Versuch.

Im Stadtverkehr bewegen sich neben motorisierten Verkehrsteilnehmern (z.B. Autos, Zweiräder) auch nicht-motorisierte Verkehrsteilnehmer (z.B. Fußgänger, Fahrradfahrer).

Ziel des Versuchs ist es, die Begegnung von Fahrradfahrern mit Fahrzeugen zu untersuchen. Ihre Aufgabe in diesem Versuch ist es, die Begegnung mit dem Fahrzeug an der Einmündung zu bewerten.

Dazu werden Sie im Simulator ein Video von einem heranfahrenden Fahrzeug sehen, welches sich Ihnen aus einer nicht vorfahrtberechtigten Straße von rechts nähert während Sie auf einem Radweg befinden.

Setzen Sie sich dazu auf das Fahrrad. **Es ist nicht notwendig, dass Sie die Pedale bedienen, das Video wird durch Ihre Bewegungen nicht beeinflusst.** Beobachten Sie das heranfahrende Fahrzeug genau.

Im Anschluss werden Sie zur Situation befragt.

Insgesamt werden Sie 12 Situationen erleben.

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

8.1.3 AP 6200 / 7300: Instruktion Probandenstudie 1

Liebe Teilnehmer*in,

vielen Dank für Ihre Unterstützung bei unserem Versuch.

In der Zukunft bewegen sich neben menschlichen Verkehrsteilnehmern (z.B. Fußgänger, Fahrradfahrer, Autofahrer) auch automatisierte Fahrzeuge im Stadtverkehr.

Ziel des Versuchs ist es, herauszufinden, wie Sie als Passagier*in in der Stadt von einem automatisierten Auto gefahren werden möchten.

Der Versuch besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil nehmen Sie die Rolle einer Passagier*in im automatisierten Fahrzeug ein. Im zweiten Teil fahren Sie selbst manuell.

Insgesamt dauert der Versuch ca. 120 Minuten.

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

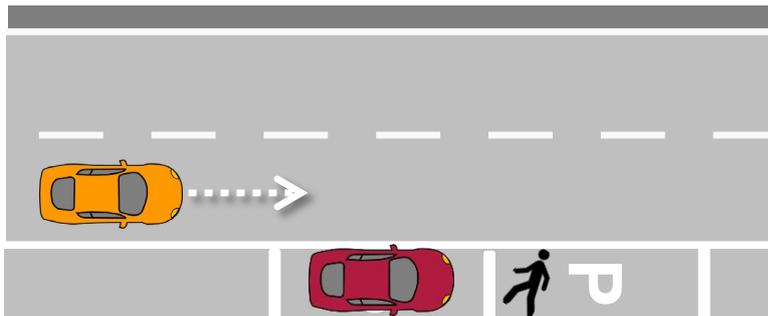
8.1.4 AP 6200 / 7300: Instruktion Studienteil 1 (Probandenstudie 1)

Liebe Teilnehmer*in,

vielen Dank für Ihre Unterstützung bei unserem Versuch.

Im ersten Versuchsteil befinden Sie sich als Passagier*in im selbstfahrenden Auto. Setzen Sie sich bitte auf den Fahrersitz und stellen Sie die Füße bequem ab. **Das automatisierte System übernimmt die Fahraufgabe (Gas geben, Bremsen, Lenken) vollständig.** Beobachten Sie das Fahrverhalten des automatisierten Fahrzeugs, in dem Sie sitzen, und den umgebenden Straßenverkehr genau. Ihre Aufgabe in diesem Versuch ist es, die erlebte Situation und die Fahrweise des selbstfahrenden Fahrzeugs zu bewerten.

Sie werden nun **die folgende Fahrsituation** erleben:



Sie werden auf einer innerstädtischen Straße **mit einem Fahrstreifen in jede Fahrtrichtung vom automatisierten Fahrzeug** gefahren. Beobachten Sie die Fahrverhalten und den Straßenverkehr genau. Im Anschluss werden Ihnen zur erlebten Situation Fragen gestellt. **Es gibt dabei keine richtigen und falschen Antworten.** Sie erleben diese Situation **insgesamt 30 Mal.** Die Fahrten dauern jeweils 30 Sekunden. Im Anschluss an die Fahrten erfolgt eine Abschlussbefragung und der zweite Versuchsteil.

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

8.1.5 AP 6200 / 7300: Instruktion Studienteil 2 (Probandenstudie 1)

Liebe Teilnehmer*in,

im zweiten Versuchsteil werden Sie nun selbst fahren.

Bevor Sie mit der Versuchsfahrt beginnen, werden Sie zunächst eine Trainingsfahrt in der simulierten Stadt absolvieren, um sich an das Fahren im Fahrsimulator zu gewöhnen und sich mit der Fahrumgebung vertraut zu machen. Das Fahrzeug verfügt über ein **Automatikgetriebe**. Sie brauchen daher **nicht zu schalten**. Sie müssen nur Gas geben und bremsen. Betätigen Sie Gas und Bremse **nur mit dem rechten Fuß**. **Den linken Fuß** können Sie **beiseite stellen**. Der Fahrersitz ist nach vorne und hinten verstellbar, jedoch nicht in seiner Höhe. Stellen Sie den Fahrersitz so ein, dass Sie bequem fahren können.

Bitte fahren Sie auf der Trainingsstrecke immer geradeaus. Biegen Sie nicht ab.

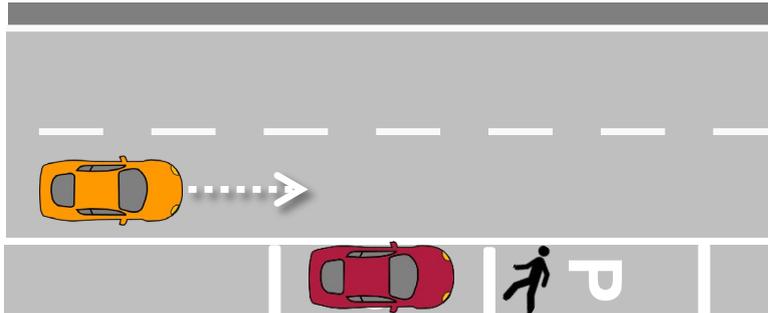
Die Trainingsfahrt dauert ca. 5 Minuten.

Gute Fahrt!

8.1.6 AP 6200 / 7300: Instruktion Studienteil 2 (Probandenstudie 1)

Liebe Teilnehmer*in,

Sie werden nun **die folgende Fahrsituation** erleben, die Sie bereits aus dem ersten Versuchsteil kennen:



Ihre Aufgabe ist es, selbst so zu fahren, wie Sie es von einem automatisierten Fahrzeug in dieser Situation wünschen.

Die zu fahrende Geschwindigkeit wird Ihnen über das Head-Up Display sowie über ein Straßenschild auf der rechten Seite angezeigt.

Sie erleben diese Situation insgesamt 4 Mal.

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

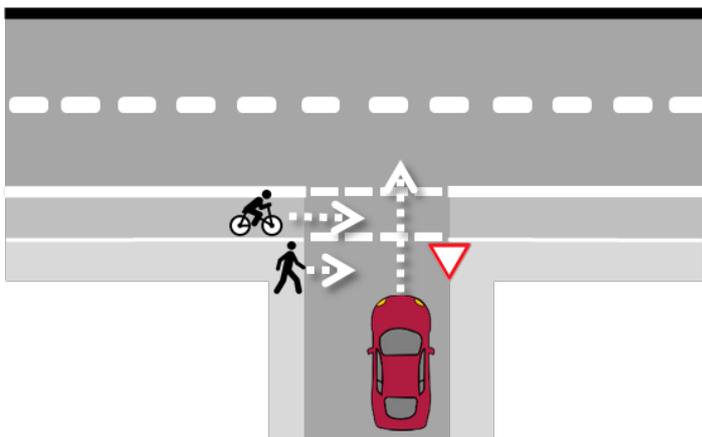
8.1.7 AP 6200 / 7300: Instruktion aus Mitfahrersicht

Im Stadtverkehr der Zukunft werden sich neben menschlichen Verkehrsteilnehmern (z.B. Fußgänger, Fahrradfahrer, Autofahrer) auch automatisierte Fahrzeuge bewegen. Mit dieser Studie möchten wir herausfinden, wie Sie in der **Stadt an einer Einmündung** von einem **automatisierten Fahrzeug** gefahren werden möchten. Automatisiert bedeutet, dass das Auto die Fahraufgabe vollständig übernimmt.

Sie werden die **Perspektive eines Passagiers in einem automatisierten Fahrzeug** einnehmen und die folgende Situation mehrmals erleben:

Sie werden auf einer innerstädtischen Straße gefahren, die auf eine Einmündung führt. Diese Einmündung wird dann von einem Fahrradfahrer oder einem Fußgänger auf einem gekennzeichneten Überweg gekreuzt. An der Einmündung ist Vorfahrt zu gewähren. Die Fahrt dauert jeweils ca. 30 Sekunden.

Die Situation ist in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt:



Wir möchten Sie darum bitten, während der Heranfahrt an die Einmündung eine **Bremmung des automatisierten Fahrzeugs einzuleiten** und zwar:

- einmal zu dem Zeitpunkt, an dem Sie eine Bremsung **ideal und vollkommen sicher** fänden und
- einmal zu dem Zeitpunkt, der für Sie den **letztmöglichen akzeptablen Zeitpunkt** für eine Bremsung darstellt, zu dem Sie sich noch sicher fühlen würden.

Sie können probeweise die **ideale** und die **letzte akzeptierte Bremsung** einleiten, um ein Gefühl für den Bremsweg und die Stärke der Verzögerung zu bekommen. Insgesamt gibt es jeweils einen Probedurchgang.

Es gibt dabei kein Richtig oder Falsch. Unser Ziel ist es, herauszufinden, welche Bremsung eines automatisierten Fahrzeugs Sie als Passagier ideal fänden bzw. welche Bremsung Sie gerade noch akzeptieren würden.

Sie können das Video mehrmals abspielen. Sie erleben einen Probedurchgang und zwei Testdurchgänge.

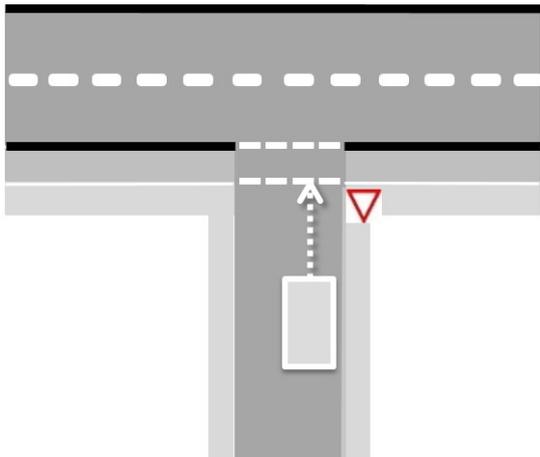
8.1.8 AP 6200 / 7300: Instruktion aus Radfahrer-/ Fußgängersicht

Im Stadtverkehr der Zukunft werden sich neben menschlichen Verkehrsteilnehmern (z.B. Fußgänger, Fahrradfahrer, Autofahrer) auch automatisierte Fahrzeuge bewegen. Mit dieser Studie möchten wir herausfinden, **wie automatisierte Fahrzeuge in der Stadt fahren sollen**, damit Sie sich sicher fühlen. Automatisiert bedeutet, dass das Auto die Fahraufgabe vollständig übernimmt.

Sie werden die **entweder die Perspektive einer Fußgänger*in oder die Perspektive einer Fahrradfahrer*in** einnehmen und die folgende Situation mehrmals erleben:

Sie bewegen sich auf eine Einmündung zu, die Sie auf einem gekennzeichneten Überweg überqueren möchten. Ein automatisiertes Fahrzeug nähert sich der Einmündung, an der Vorfahrt zu gewähren ist. Die Situation dauert jeweils ca. 30 Sekunden.

Die Situation ist in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt:



Wir möchten Sie darum bitten, während der Heranfahrt des automatisierten Fahrzeugs an die Einmündung eine **Bremmung des automatisierten Fahrzeugs einzuleiten** und zwar:

- einmal zu dem Zeitpunkt, an dem Sie eine Bremsung **ideal und vollkommen sicher** fänden und
- einmal zu dem Zeitpunkt, der für Sie den **letztmöglichen akzeptablen Zeitpunkt** für eine Bremsung darstellt, zu dem Sie sich noch sicher fühlen würden.

Sie können probeweise die **ideale** und die **letzte akzeptierte Bremsung** einleiten, um ein Gefühl für den Bremsweg und die Stärke der Verzögerung zu bekommen. Insgesamt gibt es jeweils einen Probedurchgang.

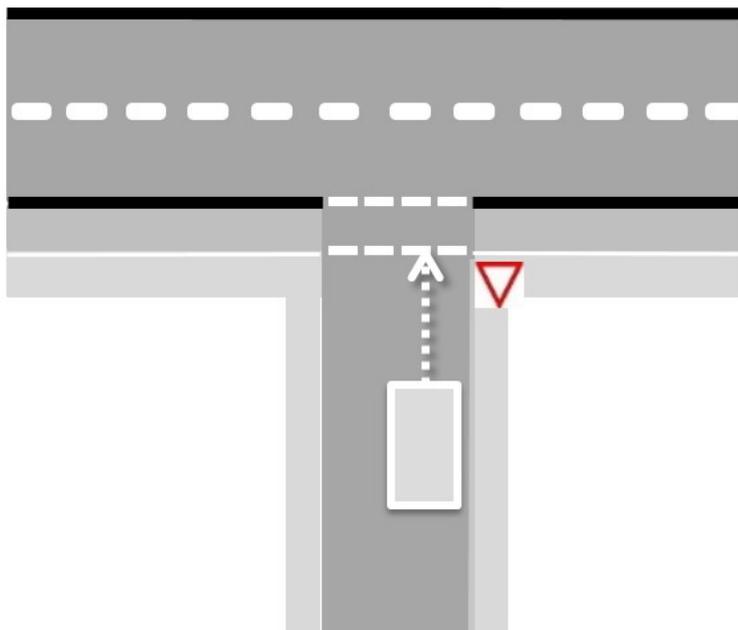
Es gibt dabei kein Richtig oder Falsch. Unser Ziel ist es, herauszufinden, welche Bremsung eines automatisierten Fahrzeugs Sie als Fußgänger*in oder Fahrradfahrer*in ideal fänden bzw. welche Bremsung Sie gerade noch akzeptieren würden.

Sie können das Video mehrmals abspielen. Sie erleben einen Probedurchgang und zwei Testdurchgänge.

8.1.9 AP 7200: Instruktionen Validierungsstudie (Einmündung)

Im folgenden Studienteil werden Sie auf einer innerstädtischen Straße automatisiert gefahren, die auf eine Einmündung führt. Diese Einmündung wird dann von einem Fahrradfahrer oder einem Fußgänger auf einem gekennzeichneten Überweg gekreuzt. An der Einmündung ist Vorfahrt zu gewähren. Die Fahrt dauert jeweils ca. 30 Sekunden.

Die Situation ist in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt:



Wir möchten Sie darum bitten, während der Heranfahrt an die Einmündung eine **Bremsung des automatisierten Fahrzeugs einzuleiten** und zwar:

- einmal zu dem Zeitpunkt, an dem Sie eine Bremsung **ideal und vollkommen sicher** fänden und
- einmal zu dem Zeitpunkt, der für Sie den **letztmöglichen akzeptablen Zeitpunkt** für eine Bremsung darstellt, zu dem Sie sich gerade noch sicher fühlen würden.

Sie können probeweise die **ideale** und die **letzte akzeptierte Bremsung mittels Knopfdruck auf den roten Knopf rechts neben Ihnen** einleiten, um ein Gefühl für den

Bremsweg und die Stärke der Verzögerung zu bekommen. Insgesamt gibt es einen Probedurchgang mit jeweils einer idealen Bremsung und einer letzten, akzeptierten Bremsung.

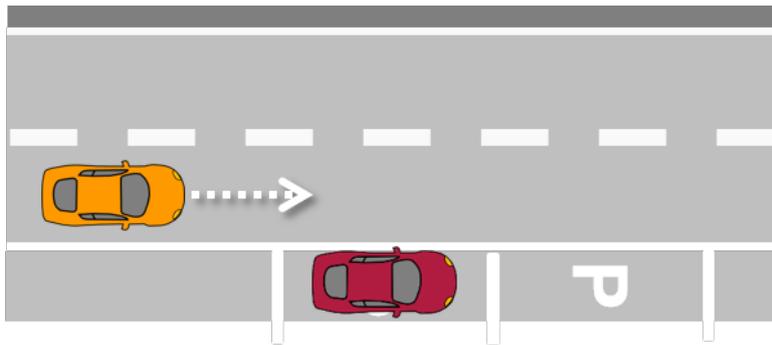
Es gibt dabei kein Richtig oder Falsch. Unser Ziel ist es, herauszufinden, welche Bremsung eines automatisierten Fahrzeugs Sie als Passagier ideal fänden bzw. welche Bremsung Sie gerade noch akzeptieren würden.

Sie erleben einen Probedurchgang mit jeweils einer idealen Bremsung und einer letzten, akzeptierten Bremsung. Anschließend erleben Sie zwei Versuchsdurchgänge, jeweils mit einer idealen Bremsung und einer letzten, akzeptablen Bremsung.

8.1.10 AP 7200: Instruktionen Validierungsstudie (Gerade Hauptstraße)

Im folgenden Studienteil werden Sie auf einer innerstädtischen Straße automatisiert gefahren und passieren ein auf dem rechten Parkstreifen parkendes Fahrzeug. Die Fahrt dauert jeweils ca. 30 Sekunden.

Die Situation ist in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt:



Nachdem Sie das parkende Fahrzeug passiert haben, wird die Versuchsleiterin die Fahrzeugregelung übernehmen und abbremsen, sodass das Fahrzeug zum Stillstand kommt.

Im Anschluss werden Ihnen zur erlebten Situation Fragen gestellt. Es gibt dabei kein Richtig oder Falsch. Stattdessen ist es unser Ziel, herauszufinden, wie Sie als Passagier im automatisierten Fahrzeug gefahren werden möchten.

Sie erleben nun zunächst **eine Trainingsfahrt.**

8.1.11 AP 7200: Hygienekonzept

- 1 Vor der Benutzung der Fahrzeuge sind diese bei nicht bekanntem Status der Reinigung zu desinfizieren.
- 2 Bei der Fahrt zum Testgelände, Bsp. Edesse, soll sich nur eine Person im Fahrzeug befinden. Wird eine weitere Person im Fahrzeug mitgenommen gilt Punkt 5.
- 3 Die Rollen, Fahrer und Sicherheitsfahrer, sind an einem Testtag fest verteilt. Diese Maßnahme dient der Verringerung der Ansteckung über Schmierkontakte (Lenkrad, Schaltung, Brille, Notebook, ...). Sollte ein Rollentausch doch erforderlich sein so ist das Fahrzeug dazwischen zu desinfizieren.
- 4 Auf dem Testgelände soll das Arbeiten möglichst so gestaltet werden, dass sich die Mitarbeiter auf mehrere Fahrzeuge verteilen.
- 5 Beim automatisierten Fahren bzw. beim Fahren mit der VR Brille sind zwei Personen im Fahrzeug. Jede Person hat zum Schutz der anderen Person eine FFP2 Maske zu tragen.
- 6 Die Fahrzeuge sind in regelmäßigen Abständen von 20 min zu lüften. Wenn möglich mit geöffneten Fenstern arbeiten. Klimaanlage: Vorsicht bei Umluft.
- 7 Nach dem Testtag werden die relevanten Oberflächen und Gerätschaften im Fahrzeug desinfiziert.
- 8 Des Weiteren sind die jeweils geltenden Hygiene- und Verhaltensregeln und Empfehlungen zur Vorbeugung von Infektionen einzuhalten.
- 9 Die Probanden sind bereits bei der Akquise über den Versuchsablauf zu informieren und vollständig über mögliche Risiken aufzuklären, um eine informierte Entscheidung über die Teilnahme an der Studie zu treffen.
- 10 Der Proband und der Sicherheitsfahrer müssen vor dem Studiendurchlauf eine „Erklärung über den fehlenden Verdacht einer Corona-Virus-Infektion“ bei der Teilnahme an der Probandenstudie abgeben und unterschreiben. Ohne diese Erklärung darf der Proband bzw. der Sicherheitsfahrer nicht an der Studie teilnehmen bzw. sich im Auto befinden.

- 11 Der Proband befindet sich während der Studie auf dem Fahrersitz, ein Sicherheitsfahrer auf dem Beifahrersitz. Vor und nach dem Durchlauf eines Probanden werden alle relevanten Flächen und Armaturen im Versuchsträger desinfiziert. Zudem wird das Fahrzeug durchgelüftet.
- 12 Sollte während eines Versuchsdurchlaufs ein Probanden- oder Sicherheitsfahrerwechsel nötig sein, werden alle relevanten Oberflächen desinfiziert und das Fahrzeug für 10 min durchgelüftet.
- 13 Die Aufenthaltsdauer im Fahrzeug wird auf das nötigste beschränkt. Allgemeine Einführungen in den Versuch und die Unterzeichnung nötiger Dokumente (siehe Punkt 10) werden außerhalb des Fahrzeugs durchgeführt.

Grundlage der Erstellung dieser Verhaltensregeln sind die

Niedersächsische Verordnung über Maßnahmen zur Eindämmung des Corona-Virus SARS-CoV-2 (Niedersächsische Corona-Verordnung) Vom 30. Oktober 2020 in der Version vom 25. Januar 2021

Auszug:

§ 3 Mund-Nasen-Bedeckung (1).4

Jede Person hat,..., eine Mund-Nasen-Bedeckung zu tragen.

Dies gilt auch für Personen, die am Unterricht oder einer Prüfung in einem Fahrzeug im Rahmen einer Fahrausbildung oder Fahrlehrerausbildung teilnehmen.

§ 5 Datenerhebung und Dokumentation (1).2

Im Rahmen des Zutritts oder der Nutzung einer Einrichtung oder der Teilnahme oder des Besuchs einer Veranstaltung hat,..., hat die Betreiberin oder der Betreiber einer Fahrschule,..., personenbezogene Daten der besuchenden oder teilnehmenden Personen zu erheben,...

8.1.12 AP 7200: Sicherheitskonzept

Liebe Studieninteressierte, lieber Studieninteressierter,

im Folgenden sind wichtige Informationen zur Ihrer Sicherheit im automatisierten Fahrzeug zusammengefasst. Bitte lesen Sie diese Sicherheitshinweise aufmerksam durch und zögern Sie nicht, sich mit Fragen an die Versuchsleiterin zu wenden:

- Sie befinden sich in einem Serienfahrzeug mit Straßenzulassung, welches für den automatisierten Fahrbetrieb umgebaut wurde. Es sind entsprechend alle serienmäßig verfügbaren passiven Sicherheitssysteme vorhanden (z.B. Airbags, Sicherheitsgurte).
- Während der gesamten Testung befindet sich eine Sicherheitsfahrerin auf dem Beifahrersitz. Diese Person ist im Umgang mit dem Versuchsträgerfahrzeug versiert.
- Der automatisierte Fahrmodus kann von der Sicherheitsfahrerin jederzeit durch den Eingriff über die angebrachte Fahrschul-Pedalerie auf der Beifahrerseite beendet werden, z.B. im Fall eines Ausfalls des automatisierten Fahrmodus.
- Ebenso können Sie selbst den automatisierten Fahrmodus während der Fahrt durch die Pedalerie oder Lenkbewegungen übersteuern und beenden. Bedenken Sie jedoch, dass Sie während der Fahrt eine VR Brille tragen. Deshalb möchten wir Sie bitten, nur dann selbst zu fahren, wenn Sie von der Sicherheitsfahrerin dazu aufgefordert wurden.
- Die Sicherheitsfahrerin beendet den automatisierten Fahrmodus nach jeder Testfahrt, indem sie das Fahrzeug abbremst. Es ist dabei möglich, dass das automatisierte Fahrzeug in der virtuellen Welt den eigenen Fahrstreifen verlässt.

8.2 Probandenstudien: Fragebögen

8.2.1 AP 4400: Soziodemographischer Fragebogen (Mitfahrer)

Demographischer Fragebogen

Bitte geben Sie Ihr Geschlecht an:

- weiblich männlich divers

Bitte geben Sie Ihr Alter an: _____ Jahre

Benötigen Sie eine Sehhilfe? Ja Nein

Wenn ja, welche? Brille Kontaktlinsen

Haben Sie bereits Erfahrungen mit Fahrsimulatoren?

- Ja, einmal Ja, mehr als einmal Nein

Informationen zum Fahrverhalten mit Kraftfahrzeugen

1. Besitzen Sie einen Führerschein? Wenn ja, seit wann (JJJJ)?

2. Wie häufig fahren Sie Auto?

-
- Täglich/fast täglich Mehrmals die Woche Mehrmals im Monat Seltener

3. Bitte geben Sie Ihre **jährliche** Fahrleistung an?

- Weniger als 3.000km
 Zwischen 3.000km und 9.000km
 Zwischen 9.000km und 12.000km
 Zwischen 12.000km und 30.000km
 Zwischen 30.000km und 50.000km

- Mehr als 50.000km
4. Wie hoch ist ungefähr Ihre **gesamte bisherige** Fahrleistung in km?
_____ km
5. Wie schätzen Sie Ihren Fahrstil ein?
- | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| sehr ruhig | eher ruhig | eher dynamisch | sehr dynamisch |
6. Wie rücksichtsvoll würden Sie Ihren Fahrstil beschreiben?
- | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| rücksichtsvoll | eher rücksichtsvoll | wenig rücksichtsvoll | nicht rücksichtsvoll |
7. Haben Sie selbst Erfahrung mit Fahrassistenzsystemen?
- Ja Nein
8. Wenn ja, mit welchen Fahrassistenzsystemen haben Sie selbst Erfahrung gesammelt?
- Tempomat
 - Tempomat mit automatischer Abstandsregelung (z.B. ACC)
 - Spurhalteassistent/Spurverlassenswarnung
 - Notbremsassistent
 - Spurwechselassistent/Totwinkel-Assistent
 - Stau-Assistent (z.B. Stop-and-Go)
 - Parkassistent
9. Wie gut fühlen Sie sich über das Thema „Automatisiertes Fahren“ informiert?
Bitte geben Sie Ihren Kenntnisstand an.
- | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> |
| sehr wenig | wenig | mittel | gut | sehr gut |

ATI Skala (Franke et al., 2019)

Im Folgenden geht es um Ihre Interaktion mit technischen Systemen. Mit ‚technischen Systemen‘ sind sowohl Apps und andere Software-Anwendungen als auch komplette digitale Geräte (z.B. Handy, Computer, Fernseher, Auto-Navigation) gemeint.

Bitte geben Sie den Grad Ihrer Zustimmung zu folgenden Aussagen an.	Stimmt gar nicht	Stimmt weitgehend nicht	Stimmt eher nicht	Stimmt eher	Stimmt weitgehend	Stimmt völlig
Ich beschäftige mich gern genauer mit technischen Systemen.	<input type="checkbox"/>					
Ich probiere gern die Funktionen neuer technischer Systeme aus.	<input type="checkbox"/>					
In erster Linie beschäftige ich mich mit technischen Systemen, weil ich muss.	<input type="checkbox"/>					
Wenn ich ein neues technisches System vor mir habe, probiere ich es intensiv aus.	<input type="checkbox"/>					
Ich verbringe sehr gern Zeit mit dem Kennenlernen eines neuen technischen Systems.	<input type="checkbox"/>					
Es genügt mir, dass ein technisches System funktioniert, mir ist es egal, wie oder warum.	<input type="checkbox"/>					
Ich versuche zu verstehen, wie ein technisches System genau funktioniert.	<input type="checkbox"/>					
Es genügt mir, die Grundfunktionen eines technischen Systems zu kennen.	<input type="checkbox"/>					
Ich versuche, die Möglichkeiten eines technischen Systems vollständig auszunutzen.	<input type="checkbox"/>					

Vielen Dank!

8.2.2 AP 4400: Soziodemographischer Fragebogen (Fahrrad)

Demographischer Fragebogen

10. Bitte geben Sie Ihr Geschlecht an:

- weiblich männlich divers

11. Bitte geben Sie Ihr Alter an: _____ Jahre

12. Benötigen Sie eine Sehhilfe? Ja Nein

13. Wenn ja, welche? Brille Kontaktlinsen

14. Haben Sie bereits Erfahrungen mit Fahrsimulatoren? Ja Nein

15. Wenn ja, in welchem? _____

Informationen zum Fahrverhalten mit Kraftfahrzeugen

16. Besitzen Sie einen Führerschein? Wenn ja, seit wann (JJJJ)?

17. Wie häufig fahren Sie Auto?

- Täglich/fast täglich Mehrmals die Woche Mehrmals im Monat Seltener

18. Bitte geben Sie Ihre **jährliche** Fahrleistung an?

- Weniger als 3.000km
 Zwischen 3.000km und 9.000km
 Zwischen 9.000km und 12.000km
 Zwischen 12.000km und 30.000km
 Zwischen 30.000km und 50.000km
 Mehr als 50.000km

19. Wie hoch ist ungefähr Ihre **gesamte bisherige** Fahrleistung in km?

_____ km

20. Wie schätzen Sie Ihren Fahrstil ein?

- sehr ruhig eher ruhig eher dynamisch sehr dynamisch

21. Wie rücksichtsvoll würden Sie Ihren Fahrstil beschreiben?

- rücksichtsvoll eher rücksichtsvoll wenig rücksichtsvoll nicht rücksichtsvoll

Informationen zum Fahrverhalten mit Fahrrädern

22. Wie häufig nutzen Sie Ihr Fahrrad?

- täglich / fast
täglich mehrmals die
Woche mehrmals im
Monat seltener nie

23. Wie fahren Sie im Schnitt bei normalen Verkehrsbedingungen (keine Glätte, kein Stau, etc.) mit dem Fahrrad?

- defensiv eher defensiv mittel eher dynamisch dynamisch

24. Wie rücksichtsvoll würden Sie Ihren Fahrradfahrstil beschreiben?

- rücksichtsvoll eher rücksichtsvoll wenig rücksichtsvoll nicht rücksichtsvoll

Vielen Dank!

8.2.3 AP 4400: Fragebogen nach jeder Einzelfahrt (Mitfahrer)

Bitte geben Sie an, mit welcher Geschwindigkeit das Fahrzeug ihrer Meinung nach auf die Einmündung zugefahren kam. Es geht uns hierbei um Ihre Wahrnehmung der Geschwindigkeit.

Das Auto fuhr _____ km/h.

Subjektives Risikoerleben (in Anlehnung an Neukum et al., 2008, Stange et al., 2020)

Bitte schauen Sie sich die folgende Skala an und entscheiden Sie sich für eine Kategorie (von *Harmlos* bis *Situation nicht akzeptabel*), die die vorangegangene Situation (die Begegnung mit dem Fahrzeug an der Einmündung) am besten beschreibt. Gegebenenfalls sollen Sie ihr Urteil dann noch verfeinern und die Unterkategorie ankreuzen, die ihre Erfahrung am besten wiedergibt (*sehr*, *mittel* oder *wenig*).

Situation nicht akzeptabel	
Grenzwertig	sehr
	mittel
	wenig
Unangenehm	sehr
	mittel
	wenig
Harmlos	

SAM Skala (Bradley & Lang, 1994, S.51)

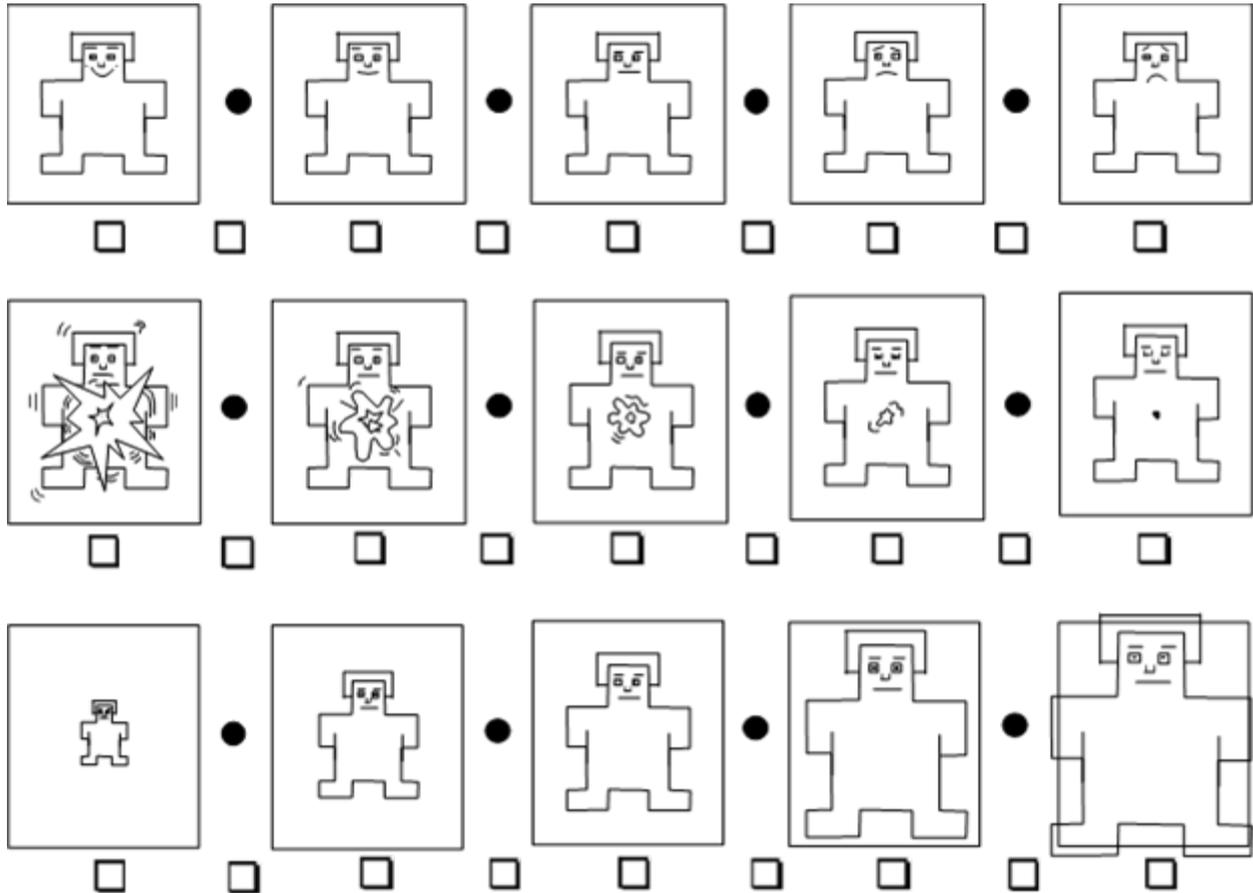
Wie haben Sie sich gefühlt?

Nachfolgend sehen Sie drei Bilderreihen. Bitte setzen Sie in jeder der drei Reihen ein Kreuz unter das Bild, das ihre Gefühle während der Begegnung mit dem Fahrzeug an der Einmündung am besten beschreibt.

Die obere Reihe reicht von *sehr unangenehm* (ganz links) bis *sehr angenehm* (ganz rechts).

Die mittlere Reihe reicht von *sehr entspannt* (ganz links) bis *stark erregt* (ganz rechts).

Die untere Reihe reicht von *sehr unterlegen* (ganz links) bis *sehr überlegen* (ganz rechts).



Bewertung der Situation

Im realen Straßenverkehr hätte ich diese Situation ohne Gefahr bewältigen können.

- | | | | | |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| trifft überhaupt nicht zu | trifft eher nicht zu | neutral | trifft zu | trifft voll und ganz zu |

Ich hätte diese Situation im realen Straßenverkehr lieber vermieden.

- | | | | | |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| trifft überhaupt nicht zu | trifft eher nicht zu | neutral | trifft zu | trifft voll und ganz zu |

Wie bewerten Sie die Fahrweise des Fahrzeugs?

Die Fahrweise war:

Bitte setzen Sie in jeder Zeile ein Kreuz.

- | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> |
| sehr defensiv | eher defensiv | teils/teils | eher dynamisch | sehr dynamisch |

sehr sicher eher sicher teils/teils eher gefährlich sehr gefährlich

sehr vorsichtig eher vorsichtig teils/teils eher riskant sehr riskant

sehr vorhersehbar eher vorhersehbar teils/teils eher unvorhersehbar sehr unvorhersehbar

Wie war die Geschwindigkeit des Fahrzeugs beim Heranfahren an die Einmündung?

zu langsam sehr langsam langsam gerade richtig schnell sehr schnell zu schnell

Wie angenehm war das Bremsverhalten des Fahrzeugs beim Heranfahren an die Einmündung?

sehr wenig eher wenig mittel eher viel sehr viel

Wie risikoreich war das Bremsverhalten des Fahrzeugs beim Heranfahren an die Einmündung?

sehr wenig eher wenig mittel eher viel sehr viel

8.2.4 AP 4400: Fragebogen nach jeder Einzelfahrt (Fahrrad)

Bitte geben Sie an, mit welcher Geschwindigkeit das Fahrzeug ihrer Meinung nach auf die Einmündung zugefahren kam. Es geht uns hierbei um Ihre Wahrnehmung der Geschwindigkeit.

Das Auto fuhr _____ km/h.

Subjektives Risikoerleben (in Anlehnung an Neukum et al., 2008, Stange et al., 2020)

Bitte schauen Sie sich die folgende Skala an und entscheiden Sie sich für eine Kategorie (von *Harmlos* bis *Situation nicht akzeptabel*), die die vorangegangene Situation (die Begegnung mit dem Fahrzeug an der Einmündung) am besten beschreibt. Gegebenenfalls sollen Sie ihr Urteil dann noch verfeinern und die Unterkategorie ankreuzen, die ihre Erfahrung am besten wiedergibt (*sehr*, *mittel* oder *wenig*).

Situation nicht akzeptabel	
Grenzwertig	sehr
	mittel
	wenig
Unangenehm	sehr
	mittel
	wenig
Harmlos	

SAM Skala (Bradley & Lang, 1994, S. 51)

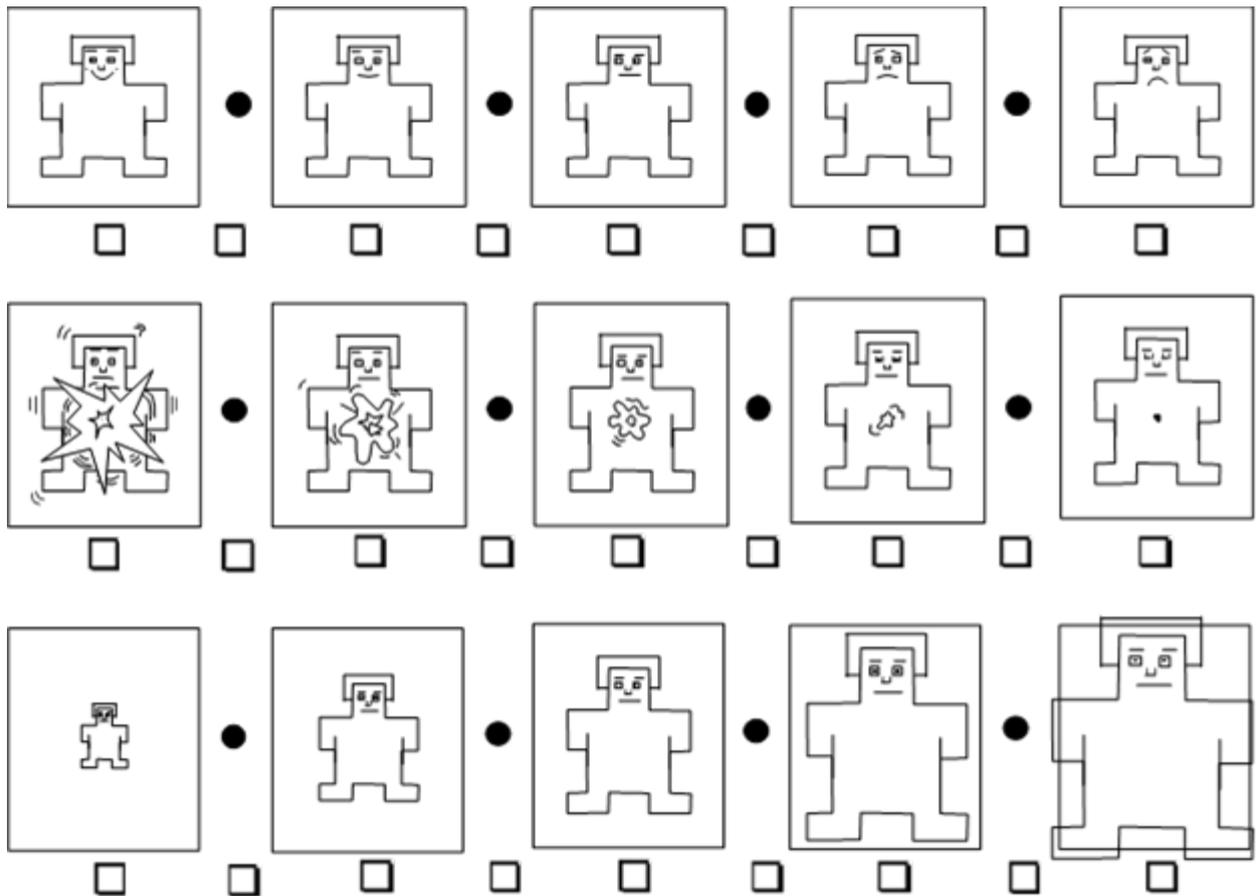
Wie haben Sie sich gefühlt?

Nachfolgend sehen Sie drei Bilderreihen. Bitte setzen Sie in jeder der drei Reihen ein Kreuz unter das Bild, das ihre Gefühle während der Begegnung mit dem Fahrzeug an der Einmündung am besten beschreibt.

Die obere Reihe reicht von *sehr unangenehm* (ganz links) bis *sehr angenehm* (ganz rechts).

Die mittlere Reihe reicht von *sehr entspannt* (ganz links) bis *stark erregt* (ganz rechts).

Die untere Reihe reicht von *sehr unterlegen* (ganz links) bis *sehr überlegen* (ganz rechts).



Bewertung der Situation

Im realen Straßenverkehr hätte ich diese Situation ohne Gefahr bewältigen können.

- | | | | | |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| trifft überhaupt nicht zu | trifft eher nicht zu | neutral | trifft zu | trifft voll und ganz zu |

Ich hätte diese Situation im realen Straßenverkehr lieber vermieden.

- | | | | | |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| trifft überhaupt nicht zu | trifft eher nicht zu | neutral | trifft zu | trifft voll und ganz zu |

Wie bewerten Sie die Fahrweise des Fahrzeugs?

Die Fahrweise war:

Bitte setzen Sie in jeder Zeile ein Kreuz.

- | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> |
| sehr defensiv | eher defensiv | teils/teils | eher dynamisch | sehr dynamisch |

- | | | | | |
|---|---|---|--|--|
| <input type="checkbox"/>
sehr sicher | <input type="checkbox"/>
eher sicher | <input type="checkbox"/>
teils/teils | <input type="checkbox"/>
eher gefährlich | <input type="checkbox"/>
sehr gefährlich |
| <input type="checkbox"/>
sehr vorsichtig | <input type="checkbox"/>
eher vorsichtig | <input type="checkbox"/>
teils/teils | <input type="checkbox"/>
eher riskant | <input type="checkbox"/>
sehr riskant |
| <input type="checkbox"/>
sehr vorhersehbar | <input type="checkbox"/>
eher vorhersehbar | <input type="checkbox"/>
teils/teils | <input type="checkbox"/>
eher
unvorhersehbar | <input type="checkbox"/>
sehr
unvorhersehbar |

Wie war die Geschwindigkeit des Fahrzeugs beim Heranfahen an die Einmündung?

- | | | | | | | |
|--|---|-------------------------------------|---|-------------------------------------|--|--|
| <input type="checkbox"/>
zu langsam | <input type="checkbox"/>
sehr
langsam | <input type="checkbox"/>
langsam | <input type="checkbox"/>
gerade
richtig | <input type="checkbox"/>
schnell | <input type="checkbox"/>
sehr schnell | <input type="checkbox"/>
zu schnell |
|--|---|-------------------------------------|---|-------------------------------------|--|--|

Wie angenehm war das Bremsverhalten des Fahrzeugs beim Heranfahen an die Einmündung?

- | | | | | |
|--|--|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <input type="checkbox"/>
sehr wenig | <input type="checkbox"/>
eher wenig | <input type="checkbox"/>
mittel | <input type="checkbox"/>
eher viel | <input type="checkbox"/>
sehr viel |
|--|--|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|

Wie risikoreich war das Bremsverhalten des Fahrzeugs beim Heranfahen an die Einmündung?

- | | | | | |
|--|--|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <input type="checkbox"/>
sehr wenig | <input type="checkbox"/>
eher wenig | <input type="checkbox"/>
mittel | <input type="checkbox"/>
eher viel | <input type="checkbox"/>
sehr viel |
|--|--|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|

8.2.5 AP 6200 / 7300: Studie 1 Soziodemographischer Fragebogen

Demographischer Fragebogen

25. Bitte geben Sie Ihr Geschlecht an:
- weiblich männlich divers
26. Bitte geben Sie Ihr Alter an: _____ Jahre
27. Haben Sie bereits Erfahrungen mit Fahrsimulatoren?
- Ja, einmal Ja, mehr als einmal Nein

Informationen zum Fahrverhalten mit Kraftfahrzeugen

28. Besitzen Sie einen Führerschein? Wenn ja, seit wann (JJJJ)?

29. Wie häufig fahren Sie Auto?
- | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Täglich/fast täglich | Mehrmals die Woche | Mehrmals im Monat | Seltener |
30. Bitte geben Sie Ihre **jährliche** Fahrleistung an?
- Weniger als 3.000km
 Zwischen 3.000km und 9.000km
 Zwischen 9.000km und 12.000km
 Zwischen 12.000km und 30.000km
 Zwischen 30.000km und 50.000km
 Mehr als 50.000km
31. Wie hoch ist ungefähr Ihre **gesamte bisherige** Fahrleistung in km?
_____ km
32. Wie schätzen Sie Ihren Fahrstil ein?
- | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| sehr ruhig | eher ruhig | eher dynamisch | sehr dynamisch |

33. Wie rücksichtsvoll würden Sie Ihren Fahrstil beschreiben?

- rücksichtsvoll eher rücksichtsvoll wenig rücksichtsvoll nicht rücksichtsvoll

34. Haben Sie selbst Erfahrung mit Fahrassistenzsystemen?

- Ja Nein

35. Wenn ja, mit welchen Fahrassistenzsystemen haben Sie selbst Erfahrung gesammelt?

- Tempomat
 Tempomat mit automatischer Abstandsregelung (z.B. ACC)
 Spurhalteassistent/Spurverlassenswarnung
 Notbremsassistent
 Spurwechselassistent/Totwinkel-Assistent
 Stau-Assistent (z.B. Stop-and-Go)
 Parkassistent

36. Wie gut fühlen Sie sich über das Thema „Automatisiertes Fahren“ informiert?

Bitte geben Sie Ihren Kenntnisstand an.

- sehr wenig wenig mittel gut sehr gut

37. Ich finde die Vorstellung von einem automatisierten Fahrzeug gefahren zu werden unangenehm.

- Trifft überhaupt nicht zu Trifft eher nicht zu Teils/teils Trifft eher zu Trifft voll und ganz zu

38. Es ist schwierig für mich, die Kontrolle über die Fahraufgabe an ein automatisiertes Fahrzeug abzugeben.

- Trifft überhaupt nicht zu Trifft eher nicht zu Teils/teils Trifft eher zu Trifft voll und ganz zu

ATI Skala (Franke et al., 2019)

Im Folgenden geht es um Ihre Interaktion mit technischen Systemen. Mit ‚technischen Systemen‘ sind sowohl Apps und andere Software-Anwendungen als auch komplette digitale Geräte (z.B. Handy, Computer, Fernseher, Auto-Navigation) gemeint.

Bitte geben Sie den Grad Ihrer Zustimmung zu folgenden Aussagen an.	Stimmt gar nicht	Stimmt weitgehend nicht	Stimmt eher nicht	Stimmt eher	Stimmt weitgehend	Stimmt völlig
Ich beschäftige mich gern genauer mit technischen Systemen.	<input type="checkbox"/>					
Ich probiere gern die Funktionen neuer technischer Systeme aus.	<input type="checkbox"/>					
In erster Linie beschäftige ich mich mit technischen Systemen, weil ich muss.	<input type="checkbox"/>					
Wenn ich ein neues technisches System vor mir habe, probiere ich es intensiv aus.	<input type="checkbox"/>					
Ich verbringe sehr gern Zeit mit dem Kennenlernen eines neuen technischen Systems.	<input type="checkbox"/>					
Es genügt mir, dass ein technisches System funktioniert, mir ist es egal, wie oder warum.	<input type="checkbox"/>					
Ich versuche zu verstehen, wie ein technisches System genau funktioniert.	<input type="checkbox"/>					
Es genügt mir, die Grundfunktionen eines technischen Systems zu kennen.	<input type="checkbox"/>					
Ich versuche, die Möglichkeiten eines technischen Systems vollständig auszunutzen.	<input type="checkbox"/>					

Vielen Dank!

8.2.6 AP 6200 / 7300: Studie 1 Fragebogen nach jeder Einzelfahrt

Erlebtes Risiko (in Anlehnung an Neukum et al., 2008, Stange et al., 2020)

Bitte schauen Sie sich die folgende Skala an und entscheiden Sie sich für eine Kategorie (von *Harmlos* bis *Situation nicht akzeptabel*), die die vorangegangene Situation am besten beschreibt. Bitte beachten Sie bei Ihrer Bewertung folgendes:

- Die Kategorie **Situation nicht akzeptabel** meint, dass ein so fahrendes automatisiertes Fahrzeug in der Realität für Sie absolut inakzeptabel wäre und auf der Straße nicht zugelassen werden darf.
- Die Kategorie **Gefährlich** meint, dass Sie die Fahrweise des automatisierten Fahrzeugs zwar gerade noch akzeptabel fanden, aber in einem so fahrenden Fahrzeug nicht mitfahren möchten.
- Die Kategorie **Unangenehm** meint, dass Sie die Fahrweise des automatisierten Fahrzeugs akzeptabel aber nicht angenehm fanden.
- Die Kategorie **Harmlos** meint, dass durch die Fahrweise des automatisierten Fahrzeugs die Situation überhaupt nicht gefährlich war.

Gegebenenfalls sollen Sie ihr Urteil dann noch verfeinern und die Unterkategorie ankreuzen, die ihre Meinung am besten wiedergibt (*sehr*, *mittel* oder *wenig*).

Situation nicht akzeptabel	
Gefährlich	sehr
	mittel
	wenig
Unangenehm	sehr
	mittel
	wenig
Harmlos	

Wie bewerten Sie die Fahrweise des Fahrzeugs, in dem Sie saßen.

Bitte setzen Sie in jede Zeile ein Kreuz.

Das Fahrzeug fuhr Das Fahrzeug fuhr beim Vorbeifahren am parkenden Fahrzeug:

<input type="checkbox"/>						
zu langsam	sehr langsam	langsam	genau richtig	schnell	sehr schnell	zu schnell

Der Abstand zum rechts parkenden Fahrzeug beim Vorbeifahren war:

- | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> |
| zu groß | sehr groß | groß | genau richtig | klein | sehr klein | zu klein |

Der Abstand zum Gegenverkehr auf Höhe des rechts parkenden Fahrzeugs war:

- | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> |
| zu groß | sehr groß | groß | genau richtig | klein | sehr klein | zu klein |

Der Abstand zur Fußgängerin auf der rechten Seite beim Vorbeifahren war:

- | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> |
| zu groß | sehr groß | groß | genau richtig | klein | sehr klein | zu klein |

In den 6 Varianten, in denen das automatisierte Fahrzeug bremste, wurde zusätzlich gefragt:

Wie war der Bremszeitpunkt des Fahrzeugs beim Vorbeifahren?

- | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> |
| zu früh | sehr früh | früh | genau richtig | spät | sehr spät | zu spät | zu spät | Keine Bremsung bemerkt |

Wie war die Bremsstärke des Fahrzeugs beim Vorbeifahren?

- | | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> |
| zu stark | sehr stark | stark | genau richtig | schwach | sehr schwach | zu schwach | Keine Bremsung bemerkt |

Wie war die Bremsdauer des Fahrzeugs beim Vorbeifahren?

- | | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> |
| Zu lang | sehr lang | lang | genau richtig | kurz | sehr kurz | zu kurz | Keine Bremsung bemerkt |

Fahrkomfort (in Anlehnung an den Discomfort-Scale; Siebert et al., 2013)

Bitte geben Sie jetzt noch an, inwieweit die folgenden Aussagen auf die vorangegangene Situation zutreffen:

Bitte setzen Sie in jede Zeile ein Kreuz.

Ich habe dem automatisierten Fahrzeug in der vorangegangenen Situation vertraut.

<input type="checkbox"/>				
Trifft gar nicht zu				Trifft voll und ganz zu

Das Fahrverhalten des automatisierten Fahrzeugs war für mich nachvollziehbar.

<input type="checkbox"/>				
Trifft gar nicht zu				Trifft voll und ganz zu

Ich wäre in der vorangegangenen Situation lieber selbst gefahren.

<input type="checkbox"/>				
Trifft gar nicht zu				Trifft voll und ganz zu

Ich habe mich dem automatisierten Fahrzeug in der vorangegangenen Situation ausgeliefert gefühlt.

<input type="checkbox"/>				
Trifft gar nicht zu				Trifft voll und ganz zu

8.2.7 AP 6200 / 7300: Studie 1 Abschlussfragebogen

Liebe*r Teilnehmer*in,

Sie haben in diesem Versuch einige Fahrweisen eines automatisierten Fahrzeugs auf einem geraden Streckenabschnitt gesehen.

Nun möchten wir Sie bitten, anzugeben, wie sich ein automatisiertes Fahrzeug in den gezeigten Situationen Ihrer Meinung nach verhalten sollte bzw. welche Fahrweise sie gefährlich fänden.

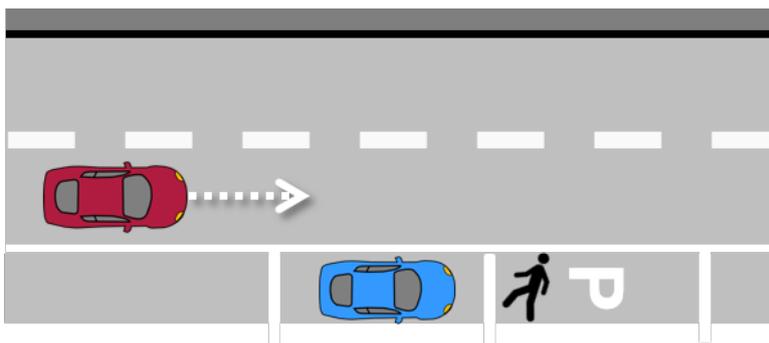
Zur Erinnerung: Sie befanden sich während des Versuchs in einem automatisierten Fahrzeug, das entweder mit Versatz nach links, mit Versatz nach rechts oder ohne Versatz an einem parkenden Fahrzeug auf der rechten Straßenseite vorbeifuhr.

Dabei hatten Sie einige Male Gegenverkehr und einige Male nicht.

Einige Male befand sich eine Fußgängerin direkt hinter dem parkenden Fahrzeug auf der rechten Straßenseite und einige Male nicht.

In einigen Szenarien bremste das automatisierte Fahrzeug, in dem Sie sich befanden, vor dem parkenden Fahrzeug leicht ab.

Situation 1:



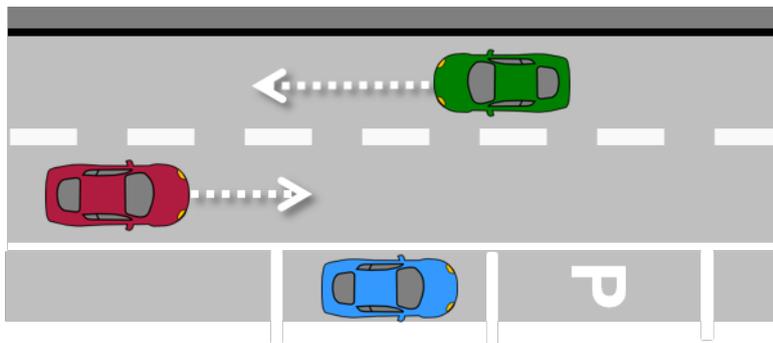
Von einem automatisierten Fahrzeug würde ich mir in dieser Situation folgende Fahrweise wünschen (Mehrfachnennungen möglich):

- Versatz nach links
- Versatz nach rechts
- Kein Versatz
- Abbremsen
- Kein Abbremsen
- Sonstiges: _____

Gefährlich fände ich es in dieser Situation, wenn das automatisierte Fahrzeug folgende Fahrweisen zeigt (Mehrfachnennungen möglich):

- Versatz nach links
- Versatz nach rechts
- Kein Versatz
- Abbremsen
- Kein Abbremsen
- Sonstiges: _____

Situation 2:



Von einem automatisierten Fahrzeug würde ich mir in dieser Situation folgende Fahrweise wünschen (Mehrfachnennungen möglich):

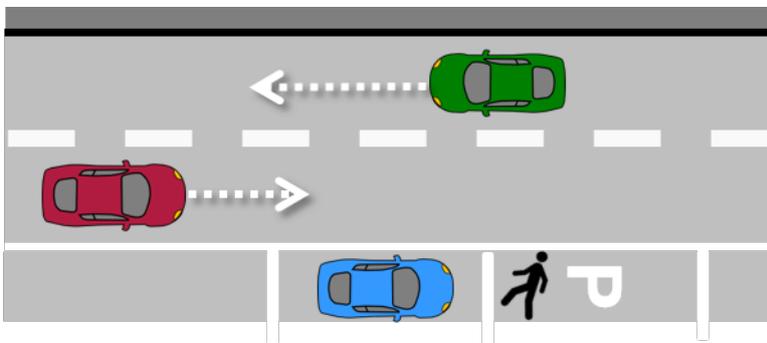
- Versatz nach links
- Versatz nach rechts
- Kein Versatz
- Abbremsen
- Kein Abbremsen

Sonstiges: _____

Gefährlich fände ich es in dieser Situation, wenn das automatisierte Fahrzeug folgende Fahrweisen zeigt (Mehrfachnennungen möglich):

- Versatz nach links
- Versatz nach rechts
- Kein Versatz
- Abbremsen
- Kein Abbremsen
- Sonstiges: _____

Situation 3:



Von einem automatisierten Fahrzeug würde ich mir in dieser Situation folgende Fahrweise wünschen (Mehrfachnennungen möglich):

- Versatz nach links
- Versatz nach rechts
- Kein Versatz
- Abbremsen
- Kein Abbremsen
- Sonstiges: _____

Gefährlich fände ich es in dieser Situation, wenn das automatisierte Fahrzeug folgende Fahrweisen zeigt (Mehrfachnennungen möglich):

- Versatz nach links
- Versatz nach rechts
- Kein Versatz
- Abbremsen
- Kein Abbremsen

Sonstiges: _____

8.2.8 AP 6200 / 7300 Studie 2 Soziodemographischer Fragebogen

Demographischer Fragebogen

Bitte geben Sie Ihr Geschlecht an:

- weiblich männlich divers

Bitte geben Sie Ihr Alter an: _____ Jahre

1. Besitzen Sie einen Führerschein? Wenn ja, seit wann (JJJJ)?

2. Wie häufig fahren Sie Auto?

- | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Täglich/fast täglich | Mehrmals die Woche | Mehrmals im Monat | Seltener |

3. Besitzen Sie einen eigenen Pkw oder haben Sie Zugang zu einem Pkw (z.B. eigener Pkw, Carsharing, Mietwagen)?

- | | |
|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Ja | Nein |

4. Bitte geben Sie Ihre **jährliche** Fahrleistung an?

- Weniger als 3.000km
- Zwischen 3.000km und 9.000km
- Zwischen 9.000km und 12.000km
- Zwischen 12.000km und 30.000km
- Zwischen 30.000km und 50.000km
- Mehr als 50.000km

5. Wie hoch ist ungefähr Ihre **gesamte bisherige** Fahrleistung in km?

_____ km

6. Wie schätzen Sie Ihren Fahrstil ein?

- sehr ruhig eher ruhig eher dynamisch sehr dynamisch

7. Wie rücksichtsvoll würden Sie Ihren Fahrstil beschreiben?

- rücksichtsvoll eher rücksichtsvoll wenig rücksichtsvoll nicht rücksichtsvoll

8. Haben Sie selbst Erfahrung mit Fahrassistenzsystemen?

- Ja Nein

9. Wenn ja, mit welchen Fahrassistenzsystemen haben Sie selbst Erfahrung gesammelt?

- Tempomat
- Tempomat mit automatischer Abstandsregelung (z.B. ACC)
- Spurhalteassistent/Spurverlassenswarnung
- Notbremsassistent
- Spurwechselassistent/Totwinkel-Assistent
- Stau-Assistent (z.B. Stop-and-Go)
- Parkassistent

10. Wie gut fühlen Sie sich über das Thema „Automatisiertes Fahren“ informiert?

Bitte geben Sie Ihren Kenntnisstand an.

- sehr wenig wenig mittel gut sehr gut

11. Bitte geben Sie nun an, inwieweit die folgenden Aussagen auf Sie zutreffen.

Ich finde die Vorstellung von einem automatisierten Fahrzeug gefahren zu werden, unangenehm.

- Trifft überhaupt nicht zu Trifft eher nicht zu Teils/teils Trifft eher zu Trifft voll und ganz zu

Es ist schwierig für mich, die Kontrolle über die Fahraufgabe an ein automatisiertes Fahrzeug abzugeben.

- Trifft überhaupt nicht zu Trifft eher nicht zu Teils/teils Trifft eher zu Trifft voll und ganz zu

ATI Skala (Franke et al., 2019)

Im Folgenden geht es um Ihre Interaktion mit technischen Systemen. Mit ‚technischen Systemen‘ sind sowohl Apps und andere Software-Anwendungen als auch komplette digitale Geräte (z.B. Handy, Computer, Fernseher, Auto-Navigation) gemeint.

Bitte geben Sie den Grad Ihrer Zustimmung zu folgenden Aussagen an.	Stimmt gar nicht	Stimmt weitgehend nicht	Stimmt eher nicht	Stimmt eher	Stimmt weitgehend	Stimmt völlig
Ich beschäftige mich gern genauer mit technischen Systemen.	<input type="checkbox"/>					
Ich probiere gern die Funktionen neuer technischer Systeme aus.	<input type="checkbox"/>					
In erster Linie beschäftige ich mich mit technischen Systemen, weil ich muss.	<input type="checkbox"/>					
Wenn ich ein neues technisches System vor mir habe, probiere ich es intensiv aus.	<input type="checkbox"/>					
Ich verbringe sehr gern Zeit mit dem Kennenlernen eines neuen technischen Systems.	<input type="checkbox"/>					
Es genügt mir, dass ein technisches System funktioniert, mir ist es egal, wie oder warum.	<input type="checkbox"/>					
Ich versuche zu verstehen, wie ein technisches System genau funktioniert.	<input type="checkbox"/>					
Es genügt mir, die Grundfunktionen eines technischen Systems zu kennen.	<input type="checkbox"/>					
Ich versuche, die Möglichkeiten eines technischen Systems vollständig auszunutzen.	<input type="checkbox"/>					

Vielen Dank!

8.2.9 AP 6200 / 7300 Studie 2 Befragung (Mitfahrer / Radfahrer / Fußgänger) nach jeder Einzelfahrt

Geben Sie hier den Abstand ein, der Ihnen beim Stopp des Videos angezeigt wird.

m

Erlebtes Risiko (in Anlehnung an Neukum et al., 2008, Stange et al., 2020)

Bitte schauen Sie sich die folgende Skala an und entscheiden Sie sich für eine Kategorie (von *Harmlos* bis *Situation nicht akzeptabel*), die die vorangegangene Situation am besten beschreibt. Bitte beachten Sie bei Ihrer Bewertung folgendes:

- Die Kategorie **Situation nicht akzeptabel** meint, dass ein so fahrendes automatisiertes Fahrzeug in der Realität für Sie absolut inakzeptabel wäre und auf der Straße nicht zugelassen werden darf.
- Die Kategorie **Gefährlich** meint, dass Sie die Fahrweise des automatisierten Fahrzeugs zwar gerade noch akzeptabel fanden, aber in einem so fahrenden Fahrzeug nicht mitfahren möchten.
- Die Kategorie **Unangenehm** meint, dass Sie die Fahrweise des automatisierten Fahrzeugs akzeptabel aber nicht ideal fanden.
- Die Kategorie **Harmlos** meint, dass durch die Fahrweise des automatisierten Fahrzeugs die Situation überhaupt nicht gefährlich war.

Gegebenenfalls sollen Sie ihr Urteil dann noch verfeinern und die Unterkategorie ankreuzen, die ihre Meinung am besten wiedergibt (*sehr*, *mittel* oder *wenig*).

Situation nicht akzeptabel	
Gefährlich	sehr
	mittel
	wenig
Unangenehm	sehr
	mittel
	wenig
Harmlos	

8.2.10AP 7200: Soziodemographischer Fragebogen

Demographischer Fragebogen

Bitte geben Sie Ihr Geschlecht an:

- weiblich männlich divers

Bitte geben Sie Ihr Alter an: _____ Jahre

11. Besitzen Sie einen Führerschein? Wenn ja, seit wann (JJJJ)?

12. Wie häufig fahren Sie Auto?

-
- Täglich/fast täglich Mehrmals die Woche Mehrmals im Monat Seltener

13. Besitzen Sie einen eigenen Pkw oder haben Sie Zugang zu einem Pkw (z.B. eigener Pkw, Carsharing, Mietwagen)?

-
- Ja Nein

14. Bitte geben Sie Ihre **jährliche** Fahrleistung an?

- Weniger als 3.000km
 Zwischen 3.000km und 9.000km
 Zwischen 9.000km und 12.000km
 Zwischen 12.000km und 30.000km
 Zwischen 30.000km und 50.000km
 Mehr als 50.000km

15. Haben Sie bereits Erfahrungen mit Fahrsimulatoren?

-
- Ja, mehr als einmal Ja, einmal Nein

16. Haben Sie bereits an einer Realfahrtstudie teilgenommen?

- Ja, mehr als einmal Ja, einmal Nein

17. Haben Sie Erfahrungen in der Arbeit mit Versuchsträgern (Realfahrzeug, z.B. ViL, RefSens)?

- Ja Nein

18. Haben Sie selbst Erfahrung mit Fahrassistenzsystemen?

- Ja Nein

19. Wenn ja, mit welchen Fahrassistenzsystemen haben Sie selbst Erfahrung gesammelt?

- Tempomat
- Tempomat mit automatischer Abstandsregelung (z.B. ACC)
- Spurhalteassistent/Spurverlassenswarnung
- Notbremsassistent
- Spurwechselassistent/Totwinkel-Assistent
- Stau-Assistent (z.B. Stop-and-Go)
- Parkassistent

20. Wie gut fühlen Sie sich über das Thema „Automatisiertes Fahren“ informiert?
Bitte geben Sie Ihren Kenntnisstand an.

- sehr wenig wenig mittel gut sehr gut

21. Bitte geben Sie nun an, inwieweit die folgenden Aussagen auf Sie zutreffen.

Ich finde die Vorstellung von einem automatisierten Fahrzeug gefahren zu werden, unangenehm.

- Trifft überhaupt nicht zu Trifft eher nicht zu Teils/teils Trifft eher zu Trifft voll und ganz zu

Es ist schwierig für mich, die Kontrolle über die Fahraufgabe an ein automatisiertes Fahrzeug abzugeben.

- Trifft überhaupt nicht zu Trifft eher nicht zu Teils/teils Trifft eher zu Trifft voll und ganz zu

ATI Skala (Franke et al., 2019)

Im Folgenden geht es um Ihre Interaktion mit technischen Systemen. Mit ‚technischen Systemen‘ sind sowohl Apps und andere Software-Anwendungen als auch komplette digitale Geräte (z.B. Handy, Computer, Fernseher, Auto-Navigation) gemeint.

Bitte geben Sie den Grad Ihrer Zustimmung zu folgenden Aussagen an.	Stimmt gar nicht	Stimmt weitgehend nicht	Stimmt eher nicht	Stimmt eher	Stimmt weitgehend	Stimmt völlig
Ich beschäftige mich gern genauer mit technischen Systemen.	<input type="checkbox"/>					
Ich probiere gern die Funktionen neuer technischer Systeme aus.	<input type="checkbox"/>					
In erster Linie beschäftige ich mich mit technischen Systemen, weil ich muss.	<input type="checkbox"/>					
Wenn ich ein neues technisches System vor mir habe, probiere ich es intensiv aus.	<input type="checkbox"/>					
Ich verbringe sehr gern Zeit mit dem Kennenlernen eines neuen technischen Systems.	<input type="checkbox"/>					
Es genügt mir, dass ein technisches System funktioniert, mir ist es egal, wie oder warum.	<input type="checkbox"/>					
Ich versuche zu verstehen, wie ein technisches System genau funktioniert.	<input type="checkbox"/>					
Es genügt mir, die Grundfunktionen eines technischen Systems zu kennen.	<input type="checkbox"/>					
Ich versuche, die Möglichkeiten eines technischen Systems vollständig auszunutzen.	<input type="checkbox"/>					

8.2.11AP 7200: Fragebogen nach jeder Einzelfahrt (Einmündung)

Erlebtes Risiko (in Anlehnung an Neukum et al., 2008, Stange et al., 2020)

Bitte schauen Sie sich die folgende Skala an und entscheiden Sie sich für eine Kategorie (von *Harmlos* bis *Situation nicht akzeptabel*), die die vorangegangene Situation am besten beschreibt. Bitte beachten Sie bei Ihrer Bewertung folgendes:

- Die Kategorie **Situation nicht akzeptabel** meint, dass ein so fahrendes automatisiertes Fahrzeug in der Realität für Sie absolut inakzeptabel wäre und auf der Straße nicht zugelassen werden darf.
- Die Kategorie **Gefährlich** meint, dass Sie die Fahrweise des automatisierten Fahrzeugs zwar gerade noch akzeptabel fanden, aber in einem so fahrenden Fahrzeug nicht mitfahren möchten.
- Die Kategorie **Unangenehm** meint, dass Sie die Fahrweise des automatisierten Fahrzeugs akzeptabel aber nicht ideal fanden.
- Die Kategorie **Harmlos** meint, dass durch die Fahrweise des automatisierten Fahrzeugs die Situation überhaupt nicht gefährlich war.

Gegebenenfalls sollen Sie ihr Urteil dann noch verfeinern und die Unterkategorie ankreuzen, die ihre Meinung am besten wiedergibt (*sehr*, *mittel* oder *wenig*).

Situation nicht akzeptabel	
Gefährlich	sehr
	mittel
	wenig
Unangenehm	sehr
	mittel
	wenig
Harmlos	

Fahrkomfort (in Anlehnung an den Discomfort-Scale; Siebert et al., 2013)

Bitte geben Sie jetzt noch an, inwieweit die folgenden Aussagen auf die vorangegangene Situation zutreffen:

Bitte setzen Sie in jede Zeile ein Kreuz.

Ich habe dem automatisierten Fahrzeug in der vorangegangenen Situation vertraut.

<input type="checkbox"/>				
Trifft gar nicht zu				Trifft voll und ganz zu

Ich wäre in der vorangegangenen Situation lieber selbst gefahren.

<input type="checkbox"/>				
Trifft gar nicht zu				Trifft voll und ganz zu

Ich habe mich dem automatisierten Fahrzeug in der vorangegangenen Situation ausgeliefert gefühlt.

<input type="checkbox"/>				
Trifft gar nicht zu				Trifft voll und ganz zu

8.2.12AP 7200: Fragebogen nach jeder Einzelfahrt (Einmündung)

Erlebtes Risiko (in Anlehnung an Neukum et al., 2008, Stange et al., 2020)

Bitte schauen Sie sich die folgende Skala an und entscheiden Sie sich für eine Kategorie (von *Harmlos* bis *Situation nicht akzeptabel*), die die vorangegangene Situation am besten beschreibt. Bitte beachten Sie bei Ihrer Bewertung folgendes:

- Die Kategorie **Situation nicht akzeptabel** meint, dass ein so fahrendes automatisiertes Fahrzeug in der Realität für Sie absolut inakzeptabel wäre und auf der Straße nicht zugelassen werden darf.
- Die Kategorie **Gefährlich** meint, dass Sie die Fahrweise des automatisierten Fahrzeugs zwar gerade noch akzeptabel fanden, aber in einem so fahrenden Fahrzeug nicht mitfahren möchten.
- Die Kategorie **Unangenehm** meint, dass Sie die Fahrweise des automatisierten Fahrzeugs akzeptabel aber nicht ideal fanden.
- Die Kategorie **Harmlos** meint, dass durch die Fahrweise des automatisierten Fahrzeugs die Situation überhaupt nicht gefährlich war.

Gegebenenfalls sollen Sie ihr Urteil dann noch verfeinern und die Unterkategorie ankreuzen, die ihre Meinung am besten wiedergibt (*sehr*, *mittel* oder *wenig*).

Situation nicht akzeptabel	
Gefährlich	sehr
	mittel
	wenig
Unangenehm	sehr
	mittel
	wenig
Harmlos	

Fahrkomfort (in Anlehnung an den Discomfort-Scale; Siebert et al., 2013)

Bitte geben Sie jetzt noch an, inwieweit die folgenden Aussagen auf die vorangegangene Situation zutreffen:

Bitte setzen Sie in jede Zeile ein Kreuz.

Ich habe dem automatisierten Fahrzeug in der vorangegangenen Situation vertraut.

<input type="checkbox"/>				
Trifft gar nicht zu				Trifft voll und ganz zu

Ich wäre in der vorangegangenen Situation lieber selbst gefahren.

<input type="checkbox"/>				
Trifft gar nicht zu				Trifft voll und ganz zu

Ich habe mich dem automatisierten Fahrzeug in der vorangegangenen Situation ausgeliefert gefühlt.

<input type="checkbox"/>				
Trifft gar nicht zu				Trifft voll und ganz zu

9 Literatur

Ackermann, C., Beggiato, M., Bluhm, L.-F., Löw, A., & Krems, J. F. (2019). Deceleration parameters and their applicability as informal communication signal between pedestrians and automated vehicles. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *62*, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.03.006>

Alessandrini, A., Alfonsi, R., Delle Site, P., & Stam, D. (2014). Users' Preferences towards Automated Road Public Transport: Results from European Surveys. *Transportation Research Procedia*, *3*, 139–144. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.099>

Baier et al. (2006). *RASt 06 – Richtlinie für Anlage von Stadtstraßen*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.

Beggiato, M., Hartwich, F., & Krems, J. F. (2017). Der Einfluss von Fahrermerkmalen auf den erlebten Fahrkomfort im hochautomatisierten Fahren. *Automatisierungstechnik*, *65*(7), 512–521. <https://doi.org/10.1515/auto-2016-0130>

Bellem, H., Schönenberg, T., Krems, J. F., & Schrauf, M. (2016). Objective metrics of comfort: Developing a driving style for highly automated vehicles. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *41*(Part A), 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.05.005>

Bellem, H., Thiel, B., Schrauf, M., & Krems, J. F. (2018). Comfort in automated driving: An analysis of preferences for different automated driving styles and their dependence on personality traits. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *55*, 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.02.036>

Bengler, K., Rettenmaier, M., Fritz, N., & Feierle, A. (2020). From HMI to HMIs: Towards an HMI Framework for Automated Driving. *Information*, *11*(2), Article 61. <https://doi.org/10.3390/info11020061>

Bock, T., Maurer, M., & Färber, G. (2007). Validation of the Vehicle in the Loop (VIL); A milestone for the simulation of driver assistance systems. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Istanbul, Türkei, 2007*, 612–617. <https://doi.org/10.1109/IVS.2007.4290183>.

Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1994). Measuring Emotion: The self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, *25*(1), 49–59. [https://doi.org/10.1016/0005-7916\(94\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0005-7916(94)90063-9)

Brell, T., Philipsen, R., & Ziefle, M. (2019). sCARY! Risk Perceptions in Autonomous Driving: The Influence of Experience on Perceived Benefits and Barriers. *Risk Analysis*, *39*(2), 342–357. <https://doi.org/10.1111/risa.13190>

Cnossen, F. (2000). *Adaptive strategies and goal management in car drivers*. Doctoral dissertation, University of Groningen.

De Looze, M. P., Kuijt-Evers, L. F. M., & van Dieen, J. (2003). Sitting comfort and discomfort and the relationships with objective measures. *Ergonomics*, 46(10), 985–997. <https://doi.org/10.1080/0014013031000121977>

Dey, D., Walker, F., Martens, M., & Terken, J. (2019). Gaze Patterns in Pedestrian Interaction with Vehicles: Towards Effective Design of External Human-Machine Interfaces for Automated Vehicles. *AutomotiveUI '19: Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 369–378. <https://doi.org/10.1145/3342197.3344523>

Destatis (2020). *Verkehrsunfälle Fachserie 8 – Reihe 7*. https://www.destatis.de/DE/Themen/GesellschaftUmwelt/Verkehrsunfaelle/Publikationen/DownloadsVerkehrsunfaelle/verkehrsunfaelle-jahr-2080700197004.pdf?__blob=publicationFile

Elbanhawi, M., Simic, M., & Jazar, R. (2015). In the Passenger Seat: Investigating Ride Comfort Measures in Autonomous Cars. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 7(3), 4–17. <https://www.doi.org/10.1109/IMITS.2015.2405571>

Franke, T., Attig, C., & Wessel, D. (2019). A Personal Resource for Technology Interaction: Development and Validation of the Affinity for Technology Interaction (ATI) Scale. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 35(6), 456–467. <https://doi.org/10.1080/10447318.2018.1456150>

Friedrich, B. (2015). Verkehrliche wirkung autonomer fahrzeuge. In *Autonomes Fahren* (pp. 331-350). Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.

Fritz, N., Kobiela, F., Manstetten, D., Korthauer, A., & Bengler, K. (2020). Designing the Interaction of Highly Automated Vehicles with Cyclists in Urban Longitudinal Traffic: Relevant Use Cases and Methodical Considerations. *AutomotiveUI '20: 12th Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 8–11. <https://doi.org/10.1145/3409251.3411710>

Fuest T., Maier A. S., Bellem H., & Bengler K. (2019). How Should an Automated Vehicle Communicate Its Intention to a Pedestrian? – A Virtual Reality Study. In T. Ahram, W. Karwowski, S. Pickl, & R. Taiar (Eds.), *Human Systems Engineering and Design II. IHSED 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1026 (pp. 195–201). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27928-8_30

Fuest, T., Michalowski, L., Träris, L., Bellem, H., & Bengler, K. (2018). Using the Driving Behavior of an Automated Vehicle to Communicate Intentions - a Wizard of Oz Study. *21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 3596–3601. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569486>

Fuller, R. (2000). The task-capability interface model of the driving process. *Recherche - Transports - Sécurité*, 66, 47–57. [https://doi.org/10.1016/S0761-8980\(00\)90006-2](https://doi.org/10.1016/S0761-8980(00)90006-2)

Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behaviour. *Accident Analysis and Prevention*, 37(3), 461–472. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2004.11.003>

Fuller, R. (2011). Driver Control Theory. From Task Difficulty Homeostasis to Risk Allostasis. In B. E. Porter (Ed.), *Handbook of Traffic Psychology* (pp. 13–26). Academic Press.

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft [GDV] (2016, December 26). Risiken richtig einschätzen? Können viele eher nicht. <https://www.gdv.de/de/themen/news/risiken-richtig-einschaetzen--koennen-viele-eher-nicht-21698> [24.11.2020]

Geßenhardt, J.; Fakler, O.; Schendzielorz, T.; Busch, F. (Hg.) (2014): Scaling up of ADAS' Traffic Impacts to German Cities. 10th ITS European Congress, Helsinki, Finland, 16–19 June 2014.

Geßenhardt, J., Schendzielorz, T., Gerstenberger, M., & Fakler, O. (2014): IMPAKT - Verkehrssimulation. Verkehrliche Wirkungen kooperativer, infrastrukturbasierter Fahrerassistenzsysteme in deutschen Städten-Grundlage für die politische Entscheidungsfindung. *Verkehrswirtschaft und -politik*, 2014.

Griesche, S., Nicolay, E., Assmann, D., Dotzauer, M., & Käthner, D. (2016). Should my car drive as I do? What kind of driving style do drivers prefer for the design of automated driving functions? 17. *Braunschweiger Symposium Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)*, 185–204.

Grunwald, A. (2015). Gesellschaftliche Risikokonstellation für autonomes Fahren – Analyse, Einordnung und Bewertung. In M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz, & H. Winner (Eds.), *Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte* (pp. 661–686). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-45854-9>

Hagenzieker, M. P., van der Kint, S., Vissers, L., van Schagen, I. N. L. G., de Bruin, J., van Gent, P., & Commandeur, J. J. F. (2020). Interactions between cyclists and automated vehicles: Results of a photo experiment. *Journal of Transportation Safety & Security*, 12(1), 94–115. <https://doi.org/10.1080/19439962.2019.1591556>

Hansen, N., & Ostermeier, A. (1996, May). Adapting arbitrary normal mutation distributions in evolution strategies: The covariance matrix adaptation. In *Proceedings of IEEE international conference on evolutionary computation* (pp. 312-317). IEEE.

Hartwich, F., Beggiato, M., & Krems, J. F. (2018). Driving comfort, enjoyment and acceptance of automated driving – effects of drivers' age and driving style familiarity. *Ergonomics*, 61(8), 1017–1032. <https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1441448>

Houston, J., Zuidhof, G., Bergamini, L., Ye, Y., Chen, L., Jain, A., Omari, S., Iglovikov, V. & Ondruska, P. (2020). One thousand and one hours: Self-driving motion prediction dataset. *arXiv preprint arXiv:2006.14480*.

Kanagaraj, V., Asaithambi, G., Kumar, C. N., Srinivasan, K. K., & Sivanandan, R. (2013). Evaluation of different vehicle following models under mixed traffic conditions. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 104, 390-401.

Krauß, S. (1998). Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics.

Kraftfahrtbundesamt (2020). *Kurzbericht Verkehr in Kilometern (VK), Zeitreihe 2014-2018*.

https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_inlaenderfahrleistung/vk_archiv/2019/verkehr_in_kilometern_kurzbericht_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=5 [24.11.2020]

Krueger, H.-P., Grein, M., Kaussner, A., & Mark, C. (2005). SILAB – a task-oriented driving simulation. *Proceeding of the driving simulator conference* (pp. 323–331). https://www.nads-sc.uiowa.edu/dscna/2005/papers/SILAB_A_task_oriented_driving_simulation.pdf [24.11.2020]

Lee, Y. M., Madigan, R., Giles, O., Garach-Morcillo, L., Markkula, G., Fox, C., Camara, F., Rothmueller, M., Vendelbo-Larsen, S. A., Holm Rasmussen, P., Dietrich, A., Nathanael, D., Portouli, V., Schieben, A., & Merat, N. (2020). Road users rarely use explicit communication when interacting in today's traffic: implications for automated vehicles. *Cognition, Technology, and Work*, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10111-020-00635-y>

Liang, X., De Almeida Correia, G. H., & Van Arem, B. (2016). Optimizing the service area and trip selection of an electric automated taxi system used for the last mile of train trips. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 93, 115–129. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.05.006>

Lopez, P. A., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y. P., Hilbrich, R., ... & Wießner, E. (2018, November). Microscopic traffic simulation using sumo. In *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (pp. 2575-2582). IEEE.

Lu, Q., Tettamanti, T., Hörcher, D., & Varga, I. (2020). The impact of autonomous vehicles on urban traffic network capacity: an experimental analysis by microscopic traffic simulation. *Transportation Letters*, 12(8), 540-549.

Markkula, G., Madigan, R., Nathanael, D., Portouli, E., Lee, Y. M., Dietrich, A., Billington, J., Schieben, A., & Merat, N. (2020). Defining interactions: a conceptual framework for understanding interactive behaviour in human and automated road traffic. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 21(6), 728–752. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2020.1736686>

McKenna, F. P. (1982). The human factor in driving accidents: An overview of approaches and problems. *Ergonomics*, 25(10), 867–877. <https://doi.org/10.1080/00140138208925047>

Näätänen, R., & Summala, H. (1974). A model for the role of motivational factors in drivers' decision-making. *Accident Analysis and Prevention*, 6(3-4), 243–261. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(74\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0001-4575(74)90003-7)

Näätänen, R., & Summala, H. (1976). *Road-user behavior and traffic accidents*. North-Holland.

National Transportation Safety Board [NTSB] (2019). Highway Accident Report. Collision Between Vehicle Controlled by Developmental Automated Driving System and Pedestrian Tempe, Arizona March 18, 2018. <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/HAR1903.pdf> [24.11.2020]

Neukum, A., Lübbecke, T., Krüger, H.-P., Mayser, C. & Steinle, J. (2008). ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen. In M. Maurer & C. Stiller (Eds.), 5. *Workshop Fahrerassistenzsysteme – FAS 2008* (pp.141–150). fmrt.

Nolte, M., Ernst, S., Richelmann, J., & Maurer, M. (2018). Representing the Unknown – Impact of Uncertainty on the Interaction between Decision Making and Trajectory Generation. *21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Maui, HI, 2018*, 2412–2418. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569490>.

Nordhoff, S., de Winter, J., Madigan, R., Merat, N., van Arem, B., & Happee, R. (2018). User acceptance of automated shuttles in Berlin-Schöneberg: A questionnaire study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 58, 843–854. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.06.024>

Pariota, L., Coppola, A., Di Costanzo, L., Di Vico, A., Andolfi, A., D'Aniello, C., & Bifulco, G. N. (2020). Integrating tools for an effective testing of connected and automated vehicles technologies. *IET Intelligent Transport Systems*, 14(9), 1025-1033.

Rothenbücher, D., Li, J., Sirkin, D., Mok, B., & Ju, W. (2016). Ghost driver: A field study investigating the interaction between pedestrians and driverless vehicles. *25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, 795–802. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2016.7745210>

SAE International (2014). Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems. [https://saemobilus.sae.org/content/j3016_201401\[24.11.2020\]](https://saemobilus.sae.org/content/j3016_201401[24.11.2020])

SAE International (2018). Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. [https://saemobilus.sae.org/content/J3016_201806/\[24.11.2020\]](https://saemobilus.sae.org/content/J3016_201806/[24.11.2020])

Schieben, A., Wilbrink, M., Kettwich, C., Madigan, M., Louw, T., & Merat, N. (2019). Designing the interaction of automated vehicles with other traffic participants: design considerations based on human needs and expectations. *Cognition, Technology & Work*, 21, 69–85. <https://doi.org/10.1007/s10111-018-0521-z>

Siebert, F.W., Oehl, M., Höger, R., & Pfister H.-R. (2013). Discomfort in Automated Driving – The Disco-Scale. In C. Stephanidis (Ed.), *HCI International 2013 - Posters' Extended Abstracts. HCI 2013. Communications in Computer and Information Science* (pp. 337–341). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39476-8_69

Stange, V., Vollrath, M., & Kühn, M. (2020). *Hochautomatisiertes Fahren im Mischverkehr. Reaktionen menschlicher Fahrer auf hochautomatisierte Fahrzeuge im Mischverkehr*. Unfallforschung der Versicherer, Forschungsbericht Nr. 71. GDV.

Summala, H. (1988). Risk control is not risk adjustment: the zero-risk theory of driver behaviour and its implications. *Ergonomics*, 31(4), 491–506. <https://doi.org/10.1080/00140138808966694>

Summala, H. (2007). Towards Understanding Motivational and Emotional Factors in Driver Behavior: Comfort through Satisficing. In P. Cacciabue (Ed.), *Modelling driver behavior in automotive environments: Critical Issues in Driver Interactions with Intelligent Transport Systems* (pp. 189–207). https://doi.org/10.1007/978-1-84628-618-6_11

Tabone, W., de Winter, J., Ackermann, C., Bärghman, J., Baumann, M., Deb, S., Emmenegger, C., Habibovic, A., Hagenzieker, M., Hancock, P. A., Happee, R., Krems, J. F., Lee, J. D., Martens, M., Merat, N., Norman, D., Sheridan, T. B., & Stanton, N. A. (2021). Vulnerable Road Users and The Coming Wave of Automated Vehicles: Expert Perspectives. https://www.researchgate.net/publication/344657741_Vulnerable_Road_Users_and_The_Coming_Wave_of_Automated_Vehicles_Expert_Perspectives.

Talebpour, A., & Mahmassani, H. S. (2016). Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 71, 143-163.

Thornton, S. M., Pan, S., Erlien, S. M., & Gerdes, J. C. (2017). Incorporating Ethical Considerations Into Automated Vehicle Control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(6), 1429-1439. <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2609339>.

Treiber, M., Hennecke, A., & Helbing, D. (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical review E*, 62(2), 1805.

Treiber, M., & Kesting, A. (2013). Microscopic calibration and validation of car-following models—a systematic approach. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 80, 922-939.

Van Aerde, M. (1995, January). Single regime speed-flow-density relationship for congested and uncongested highways. In *74th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC (Vol. 6)*.

Verband der Automobilindustrie [VDA] (2020). Automatisiertes Fahren. <https://www.vda.de/de/themen/innovation-und-technik/automatisiertes-fahren/automatisiertes-fahren.html>.

Völz, B. (2020). *Learning to Predict Pedestrians for Urban Automated Driving* [Doctoral thesis, ETH Zürich]. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000418654>

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

Wang, Y. Y., Chen, G., & Liu, Z. (2018). Modified car following and lane changing simulations model for autonomous vehicle on highway (No. 2018-01-1647). SAE Technical Paper.

Werneke, J., & Vollrath, M. (2012). What does the driver look at? The influence of intersection characteristics on attention allocation and driving behavior. *Accident Analysis and Prevention*, 45, 610–619. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.09.048>

Wilde, G. J. S. (1982). The Theory of Risk Homeostasis: Implications for Safety and Health. *Risk Analysis*, 2(4), 209–225. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1982.tb01384.x>

Winkler S., Powelleit, M., Kazazi, J., Vollrath, M., Krautter, W., Korthauer, A., Drüke, J., Töpfer, D., Semmler, C., & Bendewald, L. (2018). HMI Strategy – Warnings and Interventions. In K. Bengler, J. Drüke, S. Hoffmann, D. Manstetten, & A. Neukum (Eds.), *UR:BAN Human Factors in Traffic – Approaches for Safe, Efficient and Stress-free Urban*

Traffic (pp. 75–103). ATZ/MTZ-Fachbuch. Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-658-15418-9_5

Yerkes, R. M., & Dodson J. D. (1908). The relation of stimulus to rapidity of habit-formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, 18, 459–482. <https://doi.org/10.1002/cne.920180503>

Zhong, Z., Lee, E. E., Nejad, M., & Lee, J. (2020). Influence of CAV clustering strategies on mixed traffic flow characteristics: An analysis of vehicle trajectory data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 115, 102611.

Zhu, M., Wang, X., & Tarko, A. (2018). Modeling car-following behavior on urban expressways in Shanghai: A naturalistic driving study. *Transportation research part C: emerging technologies*, 93, 425-445.