Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Quantifizierung der Wirkung von Elementen des Strassenraumes auf die gefahrene Geschwindigkeit

Quantification of the effect of road features on driving speed

Quantification de l'effet des caractéristiques de la route sur la vitesse de conduite

FHNW – Hochschule für Angewandte Psychologie
Prof. Dr. Dorothea Schaffner
Nora Studer
Kaspar Kaufmann
Okan Yildirimlar

FHNW – Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik
Prof. Dr. Alex Erath
Dr. Michael van Eggermond

FHNW – Hochschule für Technik
Madlaina Kalunder
Prof. Dr. Simon Schubiger
Cloe Hüsser
Andrea Zirn

Rapp Trans AG
Nina Schweizer
Yves Gasser
Raffael Fischer
Severin Lauper

Forschungsprojekt SVI 2018/001 auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)

Dezember 2022 **1737**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 «Projektabschluss», welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.
Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.
Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.
Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.
Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Quantifizierung der Wirkung von Elementen des Strassenraumes auf die gefahrene Geschwindigkeit

Quantification of the effect of road features on driving speed

Quantification de l'effet des caractéristiques de la route sur la vitesse de conduite

FHNW – Hochschule für Angewandte Psychologie
Prof. Dr. Dorothea Schaffner
Nora Studer
Kaspar Kaufmann
Okan Yildirimlar

FHNW – Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik
Prof. Dr. Alex Erath
Dr. Michael van Eggermond

FHNW – Hochschule für Technik
Madlaina Kalunder
Prof. Dr. Simon Schubiger
Cloe Hüsser
Andrea Zirn

Rapp Trans AG
Nina Schweizer
Yves Gasser
Raffael Fischer
Severin Lauper

Forschungsprojekt SVI 2018/001 auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)

Dezember 2022 **1737**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung
Prof. Dr. Dorothea Schaffner
Prof. Dr. Alexander Erath

Mitglieder
FHNW – Hochschule für Angewandte Psychologie
Prof. Dr. Dorothea Schaffner
Nora Studer
Kaspar Kaufmann
Okan Yildirimlar

FHNW – Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik
Prof. Dr. Alex Erath
Dr. Michael van Eggermond

FHNW - Hochschule für Technik
Madlaina Kalunder
Prof. Dr. Simon Schubiger
Cloe Hüsser
Andrea Zirn

Rapp Trans AG
Nina Schweizer
Yves Gasser
Raffael Fischer
Severin Lauper

Ko-Finanzierung des Forschungsprojekts

Bundesamt für Umwelt BAFU; Abteilung Lärm und NIS

Begleitkommission

Präsident
Urs Gloor

Mitglieder
Martin Buck
Gianantonio Scaramuzza (bis März 2021)
Markus Geiser (ab November 2021)
Peter Lerch (bis Oktober 2021)
Pascal Gamper (ab November 2021)
Silvia Mann
Simon Steffen
Sarah Stéhly (bis März 2021)
Dominique Schneuwly (November 2021)
Alexia Roschi (ab Dezember 2021)

Antragsteller

Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von http://www.mobilityplatform.ch heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum **4**
Tabellenverzeichnis **7**
Abbildungsverzeichnis **9**
Zusammenfassung **11**
Résumé **15**
Summary **19**

1 Einleitung **23**
1.1 Problembeschreibung 23
1.2 Stand der Forschung 24
1.2.1 Einflussfaktor Gestaltung des Strassenraums 24
1.2.2 Einflussfaktor Eigenschaften der Autolenkenden 25
1.2.3 Zusammenhang von Geschwindigkeit und Unfallschwere 25
1.2.4 Messung der Geschwindigkeitswahl 25
1.3 Forschungslücken, Forschungsfragen und Begründung der Methodenwahl 26
1.4 Arbeitspakete im Überblick und Aufbau des Berichts 28

2 Grundlagenanalyse: Strassenraumgestaltung und Geschwindigkeitswahl **29**
2.1 Einführung und Aufbau des Kapitels 29
2.2 Erklärung des Zusammenhangs von Fahrgeschwindigkeit und Strassenraumgestaltung 29
2.2.1 Psychologische Prozesse 29
2.2.2 Selbsterklärende Strassen 30
2.2.3 Durchfahrtwiderstand 31
2.2.4 Zwischenfazit zum Zusammenhang Strassenraumgestaltung und Geschwindigkeitswahl 32
2.3 Methoden der Geschwindigkeitsmessung 32
2.3.1 Messung der gefahrenen Geschwindigkeit im Feld 32
2.3.2 Experiment 35
2.3.3 Befragungen 36
2.3.4 Zwischenfazit Methoden der Geschwindigkeitsmessung 36
2.4 Strassenraumgestaltungselemente 37
2.4.1 Vorgehen für die Literaturrecherche zur Wirkung der Elemente der Strassenraumgestaltung 37
2.4.2 Übersicht Gestaltungselemente 38
2.4.3 Fahrbereich 40
2.4.4 Fahrbereich: Rad-/Parkstreifen 46
2.4.5 Fussgängerraum 47
2.4.6 Stadtraum und Seitenraum 47
2.4.7 Signalisation 48
2.4.8 Zwischenfazit 49
2.5 Fazit und Input für nachfolgende Arbeitsschritte 50

3 Messungen **53**
3.1 Einführung und Aufbau des Kapitels 53
3.2 Bestehende Messungen 53
3.2.1 Datenbasis 53
3.2.2 Operationalisierung der vorhandenen Gestaltungselemente 55
3.2.3 Deskriptive Statistiken 58
3.2.4 Allgemein: Gefahrene Geschwindigkeit 62
3.2.5 Fokus: Fahrbereich 62
3.2.6 Fokus: Stadtraum 66
3.2.7 Statistische Modelle 67
3.3 Neue Messungen 69

3.3.1 Methode und Wahl der Messtrecken ... 69
3.3.2 Messort 1: Mehrzweckstreifen ... 70
3.3.3 Messort 2: Mehrzweckstreifen und Radstreifen ... 72
3.3.4 Messort 3: Bauliche Trennung ... 74
3.3.5 Messort 4: Kernfahrbahn ... 77
3.3.6 Messort 5: Radstreifen ... 79
3.4 Fazit ... 81

4 VR-Fahrsimulatorexperiment ... 85
4.1 Einführung ... 85
4.2 Grundlagen zur Wahrnehmung und Datenerhebung in VR ... 85
4.2.1 Individuum ... 85
4.2.2 VR-Simulation ... 86
4.2.3 VR-Setting ... 86
4.2.4 Presence ... 86
4.2.5 Cybersickness (Kinetose) ... 86
4.2.6 Fahrverhalten ... 87
4.3 Beschreibung der Gestaltungselemente ... 87
4.3.1 Prinzipien zur Auswahl der Gestaltungselemente ... 87
4.3.2 Gestaltungselemente für Tempo-30-Strecke ... 88
4.3.3 Gestaltungselemente für Tempo-80-Strecken ... 91
4.4 Methodisches Vorgehen ... 93
4.4.1 Versuchsablauf ... 93
4.4.2 Übungsstrecke im VR-Fahrsimulator ... 93
4.4.3 Parcours im VR-Fahrsimulator ... 93
4.4.4 Stichprobe ... 95
4.4.5 Befragung ... 96
4.4.6 Messwerte und Auswertung ... 98
4.5 Beschreibung des VR-Fahrsimulators ... 98
4.6 Resultate VR-Fahrsimulatorexperiment: Gestaltungselemente bei Tempo 30 ... 102
4.7 Resultate VR-Fahrsimulatorexperiment: Gestaltungselemente bei Tempo 80 ... 109
4.8 Fazit ... 113

5 Synthese der Ergebnisse und Handlungsempfehlungen ... 115
5.1 Wirkung der Gestaltungselemente innerorts ... 115
5.1.1 Wirkung der Gestaltungselemente in Begegnungszonen ... 115
5.1.2 Wirkung der Gestaltungselemente bei Tempo 30 ... 116
5.1.3 Wirkung der Gestaltungselemente bei Tempo 50 ... 122
5.1.4 Diskussion der Ergebnisse im Vergleich zur nationalen und internationalen Literatur – Innerorts ... 124
5.2 Wirkung der Gestaltungselemente ausserorts ... 126
5.2.1 Wirkung der Gestaltungselemente bei Tempo 80 ... 126
5.2.2 Diskussion der Ergebnisse im Vergleich zur nationalen und internationalen Literatur – Ausserorts ... 129
5.3 Fazit zu den verwendeten Methoden der Wirkungsmessung ... 129
5.3.1 Messungen im Feld ... 129
5.3.2 VR-Fahrsimulatorexperiment ... 130
5.4 Schlussfolgerungen und Ausblick ... 131

Anhang ... 133
Abkürzungsverzeichnis ... 143
Literaturverzeichnis ... 145
Projektabschluss ... 151

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Überblick über Methodenwahl 27
Tab. 2 Übersicht von Gestaltungselementen 39
Tab. 3 Übersicht kontinuierlicher Gestaltungselemente: Zusammenfassung 51
Tab. 4 Ausgewertete Geschwindigkeitsmessungen aus Messblättern 54
Tab. 5 Anzahl der ausgewerteten Geschwindigkeitsmessungen BFU 55
Tab. 6 Erhobene Gestaltungselemente im Fahrbereich 57
Tab. 7 Erhobene Gestaltungselemente im Fussgänger- und Stadtraum 58
Tab. 8 Deskriptive Statistiken Fahrbereich 59
Tab. 9 Deskriptive Statistiken Stadtraum 61
Tab. 10 Modellergebnisse Tempo 30 68
Tab. 11 Modellergebnisse Tempo 50 69
Tab. 12 Messorte Neue Messungen 70
Tab. 13 Merkmale Messort 1 71
Tab. 14 Merkmale Messort 1 (pro Richtung) 71
Tab. 15 Ergebnisse Messort 1 (pro Richtung) 72
Tab. 16 Merkmale Messort 2 73
Tab. 17 Merkmale Messort 2 (pro Richtung) 73
Tab. 18 Ergebnisse Messort 2 (pro Richtung) 74
Tab. 19 Merkmale Messort 3 75
Tab. 20 Merkmale Messort 3 (pro Richtung) 76
Tab. 21 Ergebnisse Messort 3 (pro Richtung) 76
Tab. 22 Merkmale Messort 4 77
Tab. 23 Merkmale Messort 4 (pro Richtung) 78
Tab. 24 Ergebnisse Messort 4 (pro Richtung) 78
Tab. 25 Merkmale Messort 5 79
Tab. 26 Merkmale Messort 5 (pro Richtung) 80
Tab. 27 Ergebnisse Messort 5 (pro Richtung) 80
Tab. 28 Zusammenfassung Auswertung Messungen im Fahrbereich 82
Tab. 29 Zusammenfassung Auswertung Messungen im Bereich «Fussgänger- und Stadtraum» 83
Tab. 30 Auswahl der Gestaltungselemente für Tempo 30 88
Tab. 31 Wirkungsweise der Gestaltungselemente für Tempo 30 88
Tab. 32 Experimentelle Konditionen für Tempo 30 89
Tab. 33 Abmessungen der Gestaltungselemente bei Tempo 30 90
Tab. 34 Auswahl der Gestaltungselemente für Tempo 80 91
Tab. 35 Wirkungsweise der Gestaltungselemente für Tempo 80 91
Tab. 36 Experimentelle Konditionen für Tempo 80 92
Tab. 37 Abmessungen der Gestaltungselemente in Tempo 80 92
Tab. 38 Versuchsablauf 93
Tab. 39 Aufbau einer Sequenz 94
Tab. 40 Stichprobenstruktur hinsichtlich Demografie 95
Tab. 41 Beschreibung Stichprobe hinsichtlich Fahrpraxis 95
Tab. 42 Screening-Fragebogen zu Simulator Sickness 95
Tab. 43 Aufbau Fragebogen 96
Tab. 44 Messwerte 98
Tab. 45 Vergleich von Minimalkondition 1 und Minimalkondition 2 bei Tempo 30 103
Tab. 46 Vergleich von Minimalkondition und EK1 Breites Band bei Tempo 30 104
Tab. 47 Zusammenhänge zwischen objektiver/subjektiver Geschwindigkeit und wahrgenommenem Risiko/Komplexität der EK1 Breites Band bei Tempo 30 ... 104
Tab. 48 Vergleich von Minimalkondition und EK2 Radstreifen bei Tempo 30 105
Tab. 49 Zusammenhänge zwischen objektiver/subjektiver Geschwindigkeit und wahrgenommenem Risiko/Komplexität der EK2 Radstreifen bei Tempo 30 105
Tab. 50 Vergleich von Minimalkondition und EK3 Mehrzweckstreifen bei Tempo 30 106
Tab. 51 Zusammenhänge zwischen objektiver/subjektiver Geschwindigkeit und wahrgenommenem Risiko/Komplexität der EK3 Mehrzweckstreifen bei Tempo 30 106
Tab. 52 Vergleich von Minimalkondition und EK4 Seitliche Parkplätze bei Tempo 30 .. 106

Tab. 53 Zusammenhänge zwischen objektiver/subjektiver Geschwindigkeit und wahrgenommenem Risiko/Komplexität der EK4 Seitliche Parkplätze bei Tempo 30 107
Tab. 54 Vergleich von Minimalkondition und EK5 Keine Leitlinie bei Tempo 30 107
Tab. 55 Zusammenhänge zwischen objektiver/subjektiver Geschwindigkeit und wahrgenommenem Risiko/Komplexität der EK5 Keine Leitlinie bei Tempo 30 . 108
Tab. 56 Vergleich von Minimalkondition und EK6 Bäume und Sitzbänke bei Tempo 30 108
Tab. 57 Zusammenhänge zwischen objektiver/subjektiver Geschwindigkeit und wahrgenommenem Risiko/Komplexität der EK6 Bäume und Sitzbänke in Tempo 30 109
Tab. 58 Vergleich von Minimalkondition 1 und Minimalkondition 2 bei Tempo 80 110
Tab. 59 Vergleich von Minimalkondition und EK1 Breites Band bei Tempo 80 110
Tab. 60 Zusammenhänge zwischen objektiver/subjektiver Geschwindigkeit und wahrgenommenem Risiko/Komplexität der EK1 Breites Band bei Tempo 80 ... 110
Tab. 61 Vergleich von Minimalkondition und EK2 Breites Band mit Muster bei Tempo 80 111
Tab. 62 Zusammenhänge zwischen objektiver/subjektiver Geschwindigkeit und wahrgenommenem Risiko/Komplexität der EK2 Breites Band mit Muster bei Tempo 80 111
Tab. 63 Vergleich von Minimalkondition und EK3 Breites Band mit Muster und Breite Mittellinie mit Muster bei Tempo 80 112
Tab. 64 Zusammenhänge zwischen objektiver/subjektiver Geschwindigkeit und wahrgenommenem Risiko/Komplexität der EK3 Breites Band mit Muster und Breite Mittellinie mit Muster bei Tempo 80 112
Tab. 65 Vergleich von Minimalkondition und EK4 Keine Leitlinie bei Tempo 80 113
Tab. 66 Zusammenhänge zwischen objektiver/subjektiver Geschwindigkeit und wahrgenommenem Risiko/Komplexität der EK4 Keine Leitlinie bei Tempo 80 . 113
Tab. 67 Datengrundlage aus den verschiedenen Arbeitspaketen 115
Tab. 68 Wirkung der Gestaltungselemente für Tempo 20 116
Tab. 69 Wirkung der Gestaltungselemente für Tempo 30 120
Tab. 70 Wirkung der Gestaltungselemente für Tempo 50 123
Tab. 71 Wirkung der Gestaltungselemente für Tempo 80 128

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Inhalt und Ablauf der Arbeitspakete im Überblick 28
Abb. 2 Durchfahrtwiderstands-Rose eines Strassenabschnitts (Dietiker et al., 2009) ... 31
Abb. 3 Auswertung der gefahrenen Geschwindigkeit: Standard-Messbericht eines Seitenradars 33
Abb. 4 Thematisches Schild (Goldenbeld et al., 2017) 34
Abb. 5 Leitfaden für die Beschreibung des Strassenraums 38
Abb. 6 Beispiel von überprüften Mittellinien und Querschnitten auf einer 100-km/h-Strasse in Australien mittels eines Fahrsimulators 41
Abb. 7 Kontinuierliche Massnahme (links) und Torsituation (rechts) mit dem grössten Effekt bezüglich Geschwindigkeitsabnahme (Taylor, 2002) 42
Abb. 8 Links Molino (2009) und rechts Galante (2010) 44
Abb. 9 «Median» (Grünstreifen) mit Überquerungen (Dixon et al. 2008) 45
Abb. 10 Links und Mitte: Gemeinde Oostzaan; rechts: Gemeinde Hof van Twente 46
Abb. 11 Übergeordnetes Vorgehen für die Auswertung von Geschwindigkeitsmessungen 53
Abb. 12 Betrachtungsgebiet bei der Auswertung von Messungen (Beispiel) 56
Abb. 13 Gefahrene Geschwindigkeit 62
Abb. 14 Fahrbahnbreite und gefahrene Geschwindigkeit (v_{85}), Tempo 20 64
Abb. 15 Fahrbahnbreite und gefahrene Geschwindigkeit (v_{85}), Tempo 30 65
Abb. 16 Fahrbahnbreite und gefahrene Geschwindigkeit (v_{85}), Tempo 50 66
Abb. 17 Standort Messort 1 71
Abb. 18 Standort Messort 2 73
Abb. 19 Standort Messort 3 75
Abb. 20 Standort Messort 4 77
Abb. 21 Standort Messort 5 79
Abb. 22 Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten in virtueller Umgebung 85
Abb. 23 Querschnitt der Fahrbahn in der Minimalkondition 90
Abb. 24 Aufbau des Parcours mit acht Sequenzen 94
Abb. 25 Items zu den Streckenabschnitten (hier: Minimalkondition) 97
Abb. 26 Virtual Reality Setup für die Versuche in Olten 99
Abb. 27 Auszug der exemplarischen Gebäudetypen aus dem «Swiss Building Rules»-Regelwerk 101
Abb. 28 Schematische Darstellung des mehrstufigen Aufbaus des Regelwerks 102
Abb. 29 Übersicht der Wirkung der Gestaltungselemente bei Tempo 30 auf Basis der Messung im Fahrsimulator und Befragung 103
Abb. 30 Übersicht der Wirkung der Gestaltungselemente bei Tempo 80 aufgrund Messung im Fahrsimulator und Befragung 109

Zusammenfassung

Problemstellung, Forschungsfragen und Vorgehen

Die Reduktion der gefahrenen Geschwindigkeit ist ein Schlüsselfaktor für die Sicherheit im Strassenverkehr. Nicht nur sinkt das Risiko von Verkehrsunfällen mit geringerer Geschwindigkeit, sondern auch die Schwere der Unfälle nimmt ab. Zudem sind Temporeduktionen eines der wirksamsten und günstigsten Mittel gegen Lärmemissionen. Ein weiterer zentraler Grund für die Reduktion der gefahrenen Geschwindigkeit ist die Verbesserung des Verkehrsflusses, der wiederum zu einer Verminderung von Stau führt. Insgesamt führt eine Geschwindigkeitsreduktion auch zu einer Steigerung der Nutzungs- und Aufenthaltsqualität.

Die einfachste Massnahme zur Reduktion der Geschwindigkeiten ist die Anpassung der Signalisation der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Obschon die Signalisation für die Verkehrsteilnehmenden rechtlich bindend ist, ist die Wirksamkeit dieser Massnahme aber je nach Situation beschränkt und für die Einhaltung der Geschwindigkeitsvorgaben nicht ausreichend. Damit die tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten der signalisierten Höchstgeschwindigkeit entsprechen, bedarf es gestalterischer Massnahmen. Dies ist insbesondere bei Hauptverkehrsstrassen der Fall auf denen eine Temporeduktion (z.B. zur Reduktion der Lärmemissionen) eingeführt wird oder bei Strassen wo mehr Fuss- und Veloverkehr zu erwarten ist, respektive der Fussverkehr flächig queren darf.

Somit ist die Gestaltung des Strassenraums wie auch die damit verbundene Wahrnehmung und die daraus abgeleiteten Erwartungen der Autofahrenden von entscheidender Bedeutung für die gefahrene Geschwindigkeit und die Einhaltung der Geschwindigkeitsvorgaben. Diese Erkenntnis bildet die Grundlage für das Konzept der selbsterklärenden Strassen (self-explaining roads, kurz SER). Das Konzept erklärt die Geschwindigkeitswahl mit psychologischen Prozessen: Der Strassenraum kann durch die Gestaltung (z.B. durch den Einsatz von Gestaltungselementen wie Fahrbahnbreite, verschiedene Formen der Markierung, oder vertikale Versätze) Informationen vermitteln, so dass die Strasse von den Autofahrenden so verstanden wird, wie es durch die Planung intendiert ist (z.B. als Tempo-30-Strecke). Die Autofahrenden verhalten sich entsprechend der Einordung und Erwartung an das richtige Verhalten und fahren beispielsweise mit reduzierter Geschwindigkeit, wenn bestimmte Formen der Markierung vorhanden sind.

Trotz der Bedeutung für eine präzise Planung und Projektierung wurden die Wirkungszusammenhänge zwischen Gestaltungselementen des Strassenraums und gefahrener Geschwindigkeit noch nicht systematisch untersucht. Die geplante Forschungsarbeit zielt darauf ab, diese Forschungslücke zu schliessen und die folgenden Forschungsfragen zu beantworten:

1. Welche bestehenden Gestaltungselemente beeinflussen die Geschwindigkeitswahl für verschiedene Strassentypen gemäss der bisherigen Forschung am effektivsten?
2. Was ist der quantifizierbare Einfluss von in der Schweiz bereits eingesetzten Gestaltungselementen auf die Geschwindigkeitswahl innerorts für verschiedene Strassentypen?
3. Was ist der quantifizierbare Einfluss von verschiedenen, teilweise in der Schweiz heute noch nicht eingesetzten Gestaltungselementen auf die Geschwindigkeitswahl für Hauptverkehrsstrassen innerorts und ausserorts?

Das Vorgehen basiert auf einem *Mixed-Methods*-Ansatz. Der Einfluss von Gestaltungselementen im Bereich der Fahrbahn sowie des Seiten- und Stadtraums auf die gefahrene Geschwindigkeit wurde in drei Arbeitsschritten untersucht. In einem **ersten Schritt** wurde mittels einer Literaturrecherche der Stand der nationalen und internationalen Literatur zusammengefasst. Im **zweiten Schritt** wurde der Einfluss von Gestaltungselementen auf Basis von bestehenden und neuen Messungen im Feld analysiert. Die bestehenden Messungen basieren auf Daten aus vier Kantonen (97 Messungen) und vom BFU (112 Messungen). Neue Messdaten wurden entlang von fünf Strassen jeweils an zwei Querschnitten

zum Vergleich erhoben. Für die statistische Analysen wurde pro Messort der V85-Wert verwendet. Im **dritten Arbeitsschritt** wurde mittels eines Virtual-Reality (VR)-Fahrsimulatorexperiments mit 54 Probanden die Wirkung von zehn Gestaltungselementen auf die gefahrene Geschwindigkeit erhoben. Die VR-Studie beschränkt sich auf Tempo 30 auf Hauptverkehrsstrassen und ausserorts gelegene Strassen mit einer signalisierten Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h. Zusätzlich zu den Geschwindigkeitsmessungen im VR-Fahrsimulator wurden mittels einer Befragung subjektive Einschätzungen zur Geschwindigkeitswahl und Wahrnehmung der Strasse erhoben.

Ergebnisse

Innerorts zeigen ausgewählte Gestaltungselemente einen kleinen, aber quantifizierbaren und statistisch relevanten Einfluss auf die gefahrene Geschwindigkeit. In Übereinstimmung mit bisherigen Forschungsergebnissen zeigen die für diese Arbeit zusammengetragenen Geschwindigkeitsmessungen, dass *geringere Fahrbahnbreiten* zu statistisch signifikant geringeren Geschwindigkeiten führen. So liegen die für Tempo-30-Strassen gemessenen, mittleren v85-Geschwindigkeitswerte bei einer Fahrbahnbreite von 3 m bis 5 m rund 2 - 3 km/h tiefer als bei Fahrbahnbreiten von über 6 m.

Ebenso führen längs im Strassenraum angeordnete *Parkplätze* zu einer Geschwindigkeitsreduktion. Gemäss den statistischen Modellen beträgt die auf die Längsparkierung zurückzuführende Reduktion der v85-Geschwindigkeit bei Tempo-30-Strassen 1.5 km/h und bei Tempo-50-Strassen 4.5 km/h. Der geschwindigkeitsmindernde Effekt zeigt sich im VR-Fahrsimulatorexperiment nur bei den Befragungsdaten. Entlang von Strecken mit längsparkierten Fahrzeugen liegt der Wert der bevorzugten und als sicher wahrgenommene Geschwindigkeit rund 8 bis 11 km/h tiefer als bei Strecken ohne solche Parkfelder.

Bezüglich der Wirkung von *Grünraum* wurden basierend auf den Messungen im Feld und im VR-Fahrsimulatorexperiment widersprüchliche Effekte identifiziert. Die Messungen im Feld der vorliegenden Studie zeigen für Strassen mit Tempo 30 eine statistisch signifikante Erhöhung der Geschwindigkeit v85 um 1.7 km/h, wenn Pflanzen im Seitenraum vorhanden sind. Im VR-Fahrsimulatorexperiment hingegen fuhren die Teilnehmenden um 1.2 km/h langsamer, wenn entlang der Strassen auf dem Trottoir Bäume und Sitzbänke vorhanden waren. Dieser Befund kann im Hinblick der unterschiedlichen Operationalisierung interpretiert werden: Bei den Messungen wurden auch durchgehende Hecken und Grasstreifen als Grünraumelemente codiert. Diese führen zu einer stärkeren Wahrnehmung der Trennung zwischen der Fahrbahn und dem Fussgängerraum, was den Effekt der höheren Geschwindigkeit erklären könnte.

Bei verschiedenen weiteren untersuchten Gestaltungselementen innerorts zeigen sich solche widersprüchlichen Effekte zwischen Messungen im Feld und den Messungen sowie den Befragungsdaten aus dem VR-Fahrsimulatorexperiment. Diese widersprüchlichen Effekte zeigen sich einerseits, wenn dynamische Faktoren wie Fussverkehrsaufkommen oder Veloverkehrsaufkommen mit der Wirkung der Gestaltungselemente interagieren, wie zum Beispiel bei Radstreifen und Mehrzweckstreifen. Andererseits führen diese Gestaltungselemente zu einer Wahrnehmung eines breiteren Strassenraums, was insbesondere dann zu einer Geschwindigkeitserhöhung führen kann, wenn keine Velofahrenden oder querende zu Fuss Gehende ersichtlich sind oder erwartet werden.

Die Studie zeigt auf, dass einzelne Gestaltungselemente *innerorts* insgesamt eine kleine direkte Wirkung auf die gefahrenen Geschwindigkeiten haben. Die Ergebnisse multivariater Regressionsanalysen legen aber nahe, dass die Wirkung von Gestaltungselementen nicht aufgrund einzelner Elemente, sondern als Summe der vorliegenden Massnahmen beurteilt werden muss. Weiter konnten in der vorliegenden Studie Hinweise auf die Wirkungsmechanismen der Gestaltungselemente (wahrgenommene Risiken oder Komplexität; verursacht durch andere Verkehrsteilnehmende) gewonnen werden. Die Studie kommt hier zum Schluss, dass die Wirkung von Gestaltungselementen nicht isoliert quantifiziert

werden kann, sondern dass die weiteren Verkehrsteilnehmenden die Geschwindigkeitswahl ebenfalls beeinflussen.

Ausserorts konnte auf Basis des VR-Fahrsimulatorexperiments nachgewiesen werden, dass die Gestaltungselemente «breites Band», «breites Band in Kombination mit einer breiten Mittellinie mit Muster» sowie «fehlende Leitlinie» eine kleine und konsistente quantifizierbare Geschwindigkeitsreduktion im Bereich von 1 bis 2 km/h bewirken. Diese Wirkung zeigt sich sowohl in der gefahrenen Geschwindigkeit als auch bei der subjektiv gewählten Geschwindigkeit, welche die Probandinnen und Probanden für Streckenabschnitte mit diesen Gestaltungselementen angegeben haben.

Empfehlungen

Zusammengefasst zeigt das vorliegende Forschungsprojekt, dass mit den hier angewendeten Methoden die einzelne Wirkung der Gestaltungselemente auf die gefahrene Geschwindigkeit klein ist und vor allem in Strassen ausserorts ohne Widersprüche aufgezeigt werden kann. In Übereinstimmung mit zahlreichen Studien im Bereich der Verkehrssicherheit zeigt auch das vorliegende Forschungsprojekt, dass das Verhalten im Strassenverkehr insbesondere innerorts nur multikausal erklärt werden kann, und dass bei dessen Untersuchung Faktoren der Infrastruktur und der Psychologie berücksichtigt werden müssen.

Verlässt man die Ebene der einzelnen Gestaltungselemente kann aus den Erkenntnissen abgeleitet werden, dass die gefahrene Geschwindigkeit von Autofahrenden innerorts reduziert werden kann, wenn zusätzlich zu den gesetzlich notwendigen Elementen (Markierungen und Signale) folgende Gestaltungsgrundsätze beachtet werden:

- Andere Verkehrsteilnehmende sind im Strassenraum präsent oder könnten es bald sein, sei es als mögliche Aussteigende aus einem seitlich parkierten Fahrzeug, als Querende, als Velofahrende, als zu Fuss Gehende auf dem Trottoir oder auch als entgegenkommende Fahrzeuge (insbesondere bei fehlender Leitlinie).
- Die zur Verfügung stehenden Fahrflächen sind nicht zu breit resp. werden nicht als breit wahrgenommen. Dabei ist nicht nur die Fahrbahnbreite relevant, sondern auch zusätzlich nutzbare Fahrfläche wie bspw. ein Radstreifen. Es empfehlen sich bauliche Massnahmen (z.B. Fahrradwege), da eine geschwindigkeitsmindernde Wirkung von Velospuren (nur Markierungen) nicht nachgewiesen werden kann und diese aufgrund der grösseren Fahrbahnbreite sogar zu höheren Geschwindigkeiten führen, wenn keine Fahrradfahrenden unterwegs sind.
- Die optische Kontrolle über den Strassenraum wird reduziert, sofern der Strassenverlauf oder das städtebauliche Umfeld nicht schon sehr abwechslungsreich resp. heterogen ist. Ein Strassenraum mit starker gestalterischer Regelmässigkeit auf beiden Strassenseiten erhöht die wahrgenommene Kontrolle. Diesen Effekt haben auch breite Bänder und Mehrzweckstreifen, die die Linearität des Strassenraums zusätzlich verstärken, wenn sie nicht vielfältig und abwechslungsreich gestaltet werden.

Für zukünftige Forschungsarbeiten wird empfohlen, die Wirkung von Kombinationen von Gestaltungselementen zu untersuchen. Weiter soll die Wirkung von Gestaltungselementen mit Vorher-/Nachher-Messungen untersucht werden. Ebenso gilt es besser zu ergründen, wie die Anwesenheit von anderen Verkehrsteilnehmende (Velofahrende, zu Fuss Gehende) die Geschwindigkeitswahl beeinflussen.

Die im VR-Fahrsimulatorexperiment erlangten Erkenntnisse bieten Grundlagen für Gestaltungsmassnahmen, welche auf Strassen *ausserorts* zur Temporeduktion eingesetzt werden können. In einem nächsten Schritt sollte die Wirkung dieser für Strassen mit Höchstgeschwindigkeit 80 km/h bisher in der Praxis noch nicht erprobten Gestaltungsmerkmale in Pilotstudien im Feld überprüft werden.

Résumé

Définition du problème et questions de recherche
La réduction de la vitesse de conduite est un facteur clé de la sécurité routière. Non seulement cela diminue le risque d'accident de la circulation, mais la gravité des accidents également est moindre. En outre, la réduction de la vitesse est l'un des moyens les plus efficaces et les moins coûteux de lutter contre les émissions sonores. Cela a également pour avantage d'améliorer la fluidité du trafic, ce qui entraîne une réduction des embouteillages. Enfin, une réduction de la vitesse améliore la qualité de vie en ville et se traduit par une plus grande attractivité des zones urbaines.

La mesure la plus simple pour réduire les vitesses consiste à abaisser les limites de vitesse affichées. Bien que celles-ci soient juridiquement contraignante pour les usagers de la route, l'efficacité de cette mesure dépends de la situation et ne suffit pas à elle seule à faire respecter les limites de vitesse. Des mesures de conception routière sont nécessaires pour s'assurer que la vitesse de conduite s'adapte à la limite de vitesse affichée. C'est notamment le cas pour les routes principales où une baisse de la vitesse est introduite (par exemple pour réduire les émissions sonores) ou pour les routes où l'on peut s'attendre à une augmentation du trafic piéton et cycliste, respectivement où les piétons peuvent traverser sur une grande surface.

Ainsi, la conception de la route de même que la perception associée et les attentes des conducteurs qui en découlent sont d'une importance cruciale pour la vitesse de conduite et le respect des limitations de vitesse. Cette constatation est à la base du concept de routes auto-explicatives (SER). Par le biais de leurs conception les routes peuvent interagir avec les usagers (par exemple, par l'utilisation d'éléments de conception tels que la largeur des voies, les différentes formes de marquage routier ou les décalages verticaux), de telle sorte que la situation soit comprise par les conducteurs comme voulus par les planificateurs (par exemple, comme une route avec une limite de vitesse de 30 km/h). Ainsi la perception des usagers sera en adéquation avec les objectifs de réduction de vitesses attendus sur un tronçon de route spécifique (par exemple, conduire à une vitesse réduite lorsqu'une signalisation spécifique est mise en œuvre.)

Malgré leur importance pour la planification et la conception, les interrelations entre les aménagements de la route et la vitesse définie n'ont pas encore été systématiquement étudiées. La présente étude vise à combler cette lacune et à quantifier l'effet des aménagements individuels sur les vitesses de de conduite et à répondre aux questions suivantes :

1. D'après les recherches existantes, quels aménagements routiers existants influencent le plus efficacement le choix de la vitesse pour des divers types de route ?
2. Quelle est l'influence quantifiable des aménagements présents en Suisse sur la vitesse choisie en zone urbaine pour différents types de routes ?
3. Quelle est l'influence quantifiable des différents aménagements, non mis en œuvre en Suisse, sur la vitesse de conduite pour les routes principales dans les zones urbaines et rurales ?

Ce projet utilise une approche de type méthode mixte. L'influence des aménagements de voirie sur la vitesse de conduite a été étudiée en trois étapes. Dans un premier temps, l'état de l'art de la littérature nationale et internationale a été résumé au moyen d'une recherche documentaire. Dans un deuxième temps, l'influence des aménagements a été analysée sur la base de mesures des vitesses existantes et nouvelles sur le terrain. Les mesures existantes se fondent sur les données de quatre cantons (97 mesures) et du BPA (112 mesures). De nouvelles mesures de vitesse ont été effectuées le long de cinq routes à deux sections transversales par route. Pour les analyses statistiques, la valeur v85 a été

utilisée pour chaque emplacement de mesure. Dans un troisième temps, une étude sur simulateur de conduite en réalité virtuelle (RV) avec 54 sujets a été menée pour déterminer l'effet de dix aménagements sur la vitesse de conduite. Les expériences de réalité virtuelle étaient limitées à des vitesses de 30 km/h sur des routes principales et sur des routes de campagne avec une vitesse maximale autorisée de 80 km/h. Les résultats des expériences de RV ont été utilisés pour déterminer l'effet de dix conceptions différentes sur la vitesse de conduite. En plus des mesures de vitesse effectuées dans le simulateur de conduite VR, une enquête a permis de recueillir des appréciations subjectives sur le choix de la vitesse et la perception de la route.

Résultats

Dans les zones urbaines, certaines conceptions ont une influence faible, mais quantifiable et statistiquement pertinente sur le choix de la vitesse. Conformément aux recherches précédentes, les mesures de vitesse révèlent que des voies plus étroites entraînent des vitesses inférieures statistiquement significatives. Par exemple, les valeurs moyennes de la vitesse v85 mesurées sur des routes limitées à 30 km/h sont inférieures d'environ 2 à 3 km/h pour des largeurs de voies de 3 à 5 mètres par rapport à des largeurs de voies supérieures à 6 mètres.

De même, le stationnement longitudinal entraîne une réduction de la vitesse de conduite. Une réduction statistiquement significative de la vitesse v85 due au stationnement peut être observée le long des routes avec une réduction de vitesse de 1,5 km/h pour les routes à vitesse 30 km/h et de 4,5 km/h pour les routes à vitesse 50 km/h. Dans l'étude sur simulateur de conduite RP, l'effet de réduction de la vitesse n'est évident que dans les données d'enquête. Le long des routes avec des parkings longitudinaux, la vitesse de sécurité préférée et perçue est inférieure d'environ 8 à 11 km/h à celle des routes sans ces espaces de stationnement.

Des effets contradictoires ont été identifiés entre les mesures sur le terrain et l'étude sur simulateur de conduite RV lors de la présence de végétation. Les mesures révèlent une augmentation statistiquement significative de la vitesse v85 de 1,7 km/h pour les routes à vitesse 30 lorsque de la végétation est présente sur le long de la route. En revanche, dans l'étude sur simulateur, les participants conduisaient 1,2 km/h plus lentement lorsque des arbres et des bancs étaient présents le long de la route. Cependant, ce résultat doit être interprété en tenant compte de l'opérationnalisation différente : dans les mesures, les haies continues et les bandes d'herbe ont également été codées comme des éléments d'espace vert. Ceux-ci conduisent à une perception plus forte de la séparation entre la chaussée et l'espace piéton, ce qui pourrait expliquer l'effet des vitesses plus élevées mesurées.

Pour certains aménagements, aucun effet statistiquement significatif sur la vitesse de conduite n'a pu être identifié sur la base des mesures et de l'étude sur simulateur de conduite RV. C'est le cas, par exemple, de l'effet des décalages horizontaux et verticaux au niveau des routes dont la vitesse est limitée à 30 km/h. Cependant, on ne peut pas conclure clairement que ce type de conception n'ont aucun effet. Par exemple, il se pourrait aussi que ces éléments aient été prévus en particulier sur des routes où des vitesses encore plus élevées seraient enregistrées sans ceux-ci.

L'étude montre que les aménagements individuels dans les zones urbaines ont un faible effet direct sur la vitesse de conduite. Les estimations du modèle de régression à plusieurs variables suggèrent que l'effet des aménagements ne doit pas être évalué à titre individuels, mais comme la somme des différents aménagements. En outre, la présente étude a pu fournir des informations sur les mécanismes psychologiques sous-jacents des éléments de conception (risques ou complexité aperçus ; causés par les autres usagers de la route). L'étude conclut que l'effet des aménagements ne peut être quantifié de manière

isolée, mais que les autres usagers influencent également le choix de la vitesse de conduite.

Sur la base de l'étude sur simulateur de conduite VR, il a été possible de démontrer que sur les routes rurales, les aménagements de type « marquage latéral large », « marquage latéral large en combinaison avec un marquage de séparation de voie avec motif » ou « pas de ligne centrale » produisent une réduction de vitesse quantifiable modérée et cohérente de l'ordre de 1 à 2 km/h. Cet effet se reflète à la fois dans la vitesse de conduite choisit et dans la vitesse sélectionnée subjectivement par les sujets pour les sections de route avec les aménagements respectifs dans enquête.

Recommandations

En résumé, la présente étude montre qu'avec les méthodes appliquées, l'effet individuel des aménagements sur la vitesse effective est faible et ne peut être corroboré sans contradictions que pour les routes rurales. Conformément à de nombreuses études dans le domaine de la sécurité routière, le présent projet montre également que le choix de la vitesse, en particulier dans les zones urbaines, ne peut être expliqué que de manière multicausale, et que l'infrastructure ainsi que la psychologie doivent être prises en compte.

En faisant fi des seuls aménagements individuels, on peut conclure que la vitesse de conduite dans les zones urbaines peut être réduite si, en plus des éléments légalement requis (marquages et signaux), les principes de conception suivants sont observés :

- D'autres usagers de la route sont présents ou pourraient l'être prochainement, qu'il s'agisse de conducteurs sortant de véhicules garés, de piétons traversant la chaussée, de cyclistes, de piétons sur le trottoir ou encore de véhicules venant en sens inverse (surtout en l'absence de terre-plein).
- Les espaces alloués à la conduite ne sont pas trop larges ou ne sont pas perçus comme tels. Il ne s'agit pas seulement de la largeur de la voie, mais aussi des espaces supplémentaires utilisables pour la conduite, comme les pistes cyclables. Des mesures structurelles (par exemple des pistes cyclables aménagées) sont recommandées, car réduction de la vitesse du fait des pistes cyclables uniquement indiqué par des marquages au sol ne peut pas être prouvée, mais entraîne même des vitesses plus élevées lorsqu'aucun cycliste ne circule en raison de la plus grande largeur de la voie.
- Le contrôle visuel de l'espace de la rue est réduit, sauf si le tracé de la rue ou l'environnement urbain est déjà très varié ou hétérogène. Une conception de rue avec une forte linéarité de conception des deux côtés de la rue augmente le contrôle perçu. C'est également l'effet des larges bandes et des voies polyvalentes, qui renforcent en outre la linéarité de l'espace routier si elles ne sont pas conçues de manière diverse et variée.

Pour les recherches futures, il est recommandé d'étudier l'effet des combinaisons d'éléments de conception. En outre, l'effet des aménagements devrait être étudié à l'aide de mesures avant/après. Il est également important de mieux comprendre comment la présence d'autres usagers de la route (cyclistes, piétons) influence le choix de la vitesse.

Les résultats des expériences de RV fournissent une base pour les mesures de conception qui peuvent être utilisées pour réduire la vitesse sur les routes rurales. Dans une prochaine étape, l'effet de caractéristiques d'aménagements qui n'ont pas encore été testées en pratique pour les routes avec une limite de vitesse de 80 km/h, devrait être investiguer lors d'études pilotes sur le terrain.

Summary

Scope and research questions

Reducing driving speed is a key factor in road safety. Not only does the risk of traffic accidents decrease with lower speed, but the severity of accidents also decreases. In addition, speed reductions are one of the most effective and least expensive means of combating noise emissions. Another key reason for reducing driving speed is to improve traffic flow, which in turn leads to a reduction in congestion. Finally, speed reduction leads to an increase in urban quality of life and results in a higher attractiveness of urban areas.

The simplest way to reduce speeds is to lower posted speed limits. Although the posted speed limit is legally binding for road users, the effectiveness of this measure is limited depending on the situation, and by itself is not sufficient for compliance with the speed limits. Road design measures are required to ensure that the driving speed corresponds to the posted speed limit. This is especially the case for main roads where a speed reduction is introduced (e.g. to reduce noise emissions), for roads where more pedestrian and bicycle traffic is expected, or for roads where pedestrian traffic is allowed to cross the road over a wide area.

Thus, road design as well as the associated perception and the expectations of drivers derived from it are of crucial importance for driving speed and compliance with speed limits. This insight forms the basis for the concept of self-explaining roads (SER). Road design can convey information through design (e.g., using design elements such as lane width, various forms of road markings, or vertical offsets), in a way that the road is understood by drivers as intended by the planners (e.g., as a road with a 30 km/h speed limit). Drivers behave according to their perception and expectations regarding the correct behavior on a specific road and, for example, drive at reduced speed when certain forms of road marking are present.

Despite the importance for planning and design, the interrelationships between road design elements and speed choice have not yet been systematically investigated. This research seeks to close this research gap and to quantify the effect of individual design elements on travel speeds with a combination of field and laboratory research. Against this background, the current research project aims to answer the following research questions:

1. Which existing road design elements most effectively influence speed choice for different road types according to previous research?
2. What is the quantifiable influence of road design elements already in use in Switzerland on speed choice in urban areas for different road types?
3. What is the quantifiable influence of different design elements, some of which are not yet used in Switzerland, on the driving speed for major roads in urban and rural areas?

This project uses a mixed method approach. The influence of road design elements on driving speed was investigated in three steps. In a **first step**, the state of the art of national and international literature was summarized by means of literature research. In a **second step**, the influence of design elements was analyzed based on existing and new measurements in the field. The existing measurements are based on data from four cantons (97 measurements) and from BFU (112 measurements). New speed measurements were conducted along five roads at two cross-sections per road. For the statistical analyses, the v85 value was used for each measurement location. In a **third step**, a virtual reality (VR) driving simulator study with 54 subjects was conducted to determine the effect of ten design elements on the driving speed. The VR experiments were limited to speed limits of 30 km/h on main roads and on rural roads with a posted maximum speed limit of 80 km/h. The results of the VR experiments were used to determine the effect of ten design elements on

driving speed. In addition to the speed measurements in the VR driving simulator, subjective assessments of speed choice and perception of the road were collected by means of a survey.

Results

In urban areas, selected design elements show a small but quantifiable and statistically relevant influence on speed choice. In line with previous research, speed measurements reveal that narrower lane widths result in statistically significant lower speeds. For example, the mean v85 speed values measured for roads with a 30 km/h speed limit are about 2–3 km/h lower for lane widths of 3m to 5m than for lane widths greater than 6m.

Likewise, longitudinal parking leads to a reduction in driving speed. A statistically significant reduction in v85 driving speed due to parking can be observed along roads with a speed limit of 30 km/h of 1.5 km/h for roads and 4.5 km/h for roads with a speed limit of 50 km/h. In the VR driving simulator experiment, the speed-reducing effect is only evident in the survey data. Along roads with longitudinal parking, the preferred and perceived safe speed is about 8 to 11 km/h lower than along roads without such parking spaces.

Contradictory effects were identified between speed measurements and the VR driving simulator study for the presence of greenery. Measurements in the field reveal a statistically significant increase of speed v85 by 1.7 km/h for roads with a speed limit of 30 km/h when vegetation is present on the roadside. In the VR driving simulator study, however, participants drove 1.2 km/h slower when trees and benches were present along the road. However, this finding has to be interpreted with regard to the different operationalization: In the measurements, continuous hedges and grass strips were also coded as green space elements. These lead to a stronger perception of the separation between the roadway and the pedestrian space, which could explain the effect of higher speeds measured.

For some design elements, no statistically significant effects on driving speed could be identified based on the measurements and the VR driving simulator study. This applies, for example, to the effect of horizontal and vertical offsets on roads with a speed limit of 30 km/h. However, it cannot be directly concluded that these design elements have no effect. For example, it could also be that these elements were provided in particular on roads where even higher speeds would be recorded without these elements.

The study shows that individual design elements in urban areas have a small direct effect on driving speed. Multivariate regression model estimates suggest that the effect of design elements must not be assessed only on the basis of individual elements, but as the sum of different design elements. Furthermore, the present study was able to provide information on the underlying psychological mechanisms of the design elements (perceived risks or complexity; caused by other road users). The study concludes that the effect of design elements cannot be quantified in isolation, but that other road users also influence the choice of driving speed.

On the basis of the VR driving simulator study, it was possible to demonstrate that on rural roads the design elements "wide side marking", "wide side marking in combination with a lane separation marking with pattern" and "no centerline" produce a small and consistent quantifiable speed reduction in the range of 1 to 2 km/h. This effect is reflected both in driving speed and in the subjectively selected speed that the test subjects indicated for the road sections with the respective design elements.

Recommendations

In summary, the present research project shows that with the methods applied, the individual effect of the design elements on the speed driven is small and can only be substantiated

without contradictions for rural roads. In accordance with numerous studies in the field of road safety, the present research project also shows that speed choice particularly in urban areas can only be explained in a multicausal way, and that infrastructure as well as psychology have to be taken into account in its investigation.

Leaving the level of individual design elements, it can be concluded that the driving speed in urban areas can be reduced if, in addition to the legally required elements (markings and signals), the following design principles are observed:

- Other road users are present or could be present soon, be it as drivers getting out from parked vehicles, as crossing pedestrians, as cyclists, as pedestrians on the sidewalk or also as oncoming vehicles (especially in the absence of a median).
- The space allotted to driving is not too wide or is not perceived as wide. Not only the lane width is relevant, but also additional usable driving spaces such as bike lanes. Structural measures (e.g. built-up bicycle lanes) are recommended, since a speed-reducing effect of bicycle lanes (only markings) cannot be proven and, due to the larger lane width, even leads to higher speeds when no cyclists are on the road.
- The visual control over the street space is reduced, unless the course of the street or the urban environment is already very varied or heterogeneous. A street design with strong design linearity on both sides of the street increases the perceived control. This is also the effect of wide side markings and multi-purpose lanes, which additionally reinforce the linearity of the road space if they are not designed in a diverse and varied manner.

For future research it is recommended to investigate the effect of combinations of design elements. Furthermore, the effect of design elements should be investigated with before/after measurements. It is also important to better understand how the presence of other road users (cyclists, pedestrians) influence the speed choice.

The findings of the VR experiments provide a basis for design measures that can be used to reduce speed on rural roads. In a next step, the effect of these design features, which have not yet been tested in practice for roads with a speed limit of 80 km/h, should be tested in pilot studies in the field.

1 Einleitung

1.1 Problembeschreibung

Die Reduktion der gefahrenen Geschwindigkeit ist ein Schlüsselfaktor für die Sicherheit im Strassenverkehr. Nicht nur steigt das Risiko von Verkehrsunfällen mit zunehmender Geschwindigkeit, sondern auch die Schwere der Unfälle nimmt zu (Aarts & van Schagen, 2006; Elvik, 2013). Dabei kann die Beziehung zwischen Unfallrisiko und Geschwindigkeit am besten mit nichtlinearen Modellen, bei denen das Unfallrisiko schneller steigt als der Geschwindigkeitsunterschied, erklärt werden (Elvik, 2013; Sadia et al., 2018). Ebenfalls erhöht eine breite Verteilung der gefahrenen Geschwindigkeit das Unfallrisiko (Aarts & van Schagen, 2006). Ein weiterer zentraler Grund für die Bedeutung der Reduktion der Geschwindigkeit ist die Verbesserung des Verkehrsflusses, der wiederum zu einer Verminderung von Stau führt. Zudem führt die Reduktion der Geschwindigkeit zu einer Steigerung der Nutzungs- und Aufenthaltsqualität (Häfliger et al., 2019). Weiter handelt es sich bei Temporeduktionen um eines der wirksamsten und günstigsten Mittel gegen Lärmemissionen (EKLB, 2015; Grolimund und Partner, 2017; Tiefbauamt des Kantons Bern, 2010).

Signalisierte Geschwindigkeitslimiten sind eine zentrale Massnahme zur Reduktion der gefahrenen Geschwindigkeit. Doch gesetzliche Vorgaben allein sind für die Einhaltung der Geschwindigkeitsvorgaben nicht ausreichend (Sadia et al., 2018). Von entscheidender Bedeutung für die gefahrene Geschwindigkeit ist die Gestaltung des Strassenraums (z.B. Breite der Fahrstreifen), Gestaltung des Strassenquerschnitts (z.B. Trennung zum Trottoir, Grünflächen), Strassenmöblierung und Städtebau (z.B. Sichtweiten, Erdgeschossnutzung, Gebäudekubatur) und dessen Wahrnehmung durch die Autofahrenden. Aus dem Zusammenspiel von Wahrnehmung und Gestaltungselementen resultiert der Durchfahrtswiderstand, welcher die Grundlage für die gefahrene Geschwindigkeit bildet. Dieses Wechselspiel ist die Grundlage für das Konzept der selbsterklärenden Strassen (self-explaining roads, kurz SER) (Mackie, 2013; Scaramuzza et al., 2016; Theeuwes & Godthelp, 1995). In der Praxis setzt sich dieses Konzept international und auch in der Schweiz immer mehr durch. Damit rückt aus verkehrsplanerischer Perspektive die Gestaltung des Strassenraums ins Zentrum des Forschungsinteresses.

In vielen Schweizer Städten gibt es Bestrebungen, den Ausbau von Begegnungszonen mit einer signalisierten Höchstgeschwindigkeit von 20 km/h (Kilometer pro Stunde) weiter voranzutreiben. Zwei Forschungsarbeiten haben dabei die rechtlichen und verkehrsplanerischen Grundlagen (Steiner et al., 2013) sowie die funktionelle Wirksamkeit von Begegnungszonen untersucht (Graf et al., 2017). Inwiefern das Erscheinungsbild einer Begegnungszone dazu beiträgt, dass Autolenkende erkennen, dass sie keinen Vortritt haben und maximal 20 km/h fahren dürfen, blieb bisher als Forschungsfrage unbeantwortet.

Es bestehen Pläne und erste Pilotversuche, das Geschwindigkeitsregime auch bei Hauptverkehrsstrassen von 50 km/h auf 30 km/h zu reduzieren, um in der Folge eine höhere Verkehrssicherheit und eine geringere Lärmbelastung zu erreichen (Wessels & Groff, 2013). Eine Umsetzung dieser Vorhaben erfolgte aufgrund möglicher Einsprachen und der rechtlich unklaren Situation bisher selten. Aufgrund des Bundesgerichtsurteils 1C_11/2017, das eine solche Temporeduktion ausdrücklich als geeignete verkehrsplanerische Massnahme anerkennt, ist zu erwarten, dass solche Vorhaben öfters geplant und umgesetzt werden. Viele der Gestaltungselemente, die sich in Tempo-30-Zonen zur Reduktion der gefahrenen Geschwindigkeiten bewährten, eignen sich jedoch nicht für den Einsatz bei Hauptverkehrsstrassen (Häfliger et al., 2019). Beispielsweise ist von einem Einsatz von vertikalen Versätzen (Bremsschwellen) aufgrund der Lärmproblematik abzusehen. Zudem führen innerorts entlang Hauptverkehrsstrassen oft auch ÖV-Linien, die weitere Herausforderungen für die Gestaltung mit sich bringen.

Aufgrund der im Rahmen des Forschungspaktes VeSPA (Verkehrssicherheitsgewinne aus Erkenntnissen aus Datapooling und strukturierten Datenanalysen) durchgeführten Analysen wurde erkannt, dass auf Strassen ausserorts die Häufigkeit von Schleuder- und Selbstunfällen einen degressiven Zusammenhang mit dem durchschnittlichen Tagesverkehr

(DTV) aufweist (Schüller et al., 2014). Das heisst, dass Unfälle, die primär auf überhöhte Geschwindigkeit zurückzuführen sind, in Bezug auf die Fahrleistung häufiger auf Strecken mit weniger Verkehr auftreten. Dies wird auf den Umstand zurückgeführt, dass bei geringer Verkehrsbelastung die Geschwindigkeit eher unabhängig von anderen Fahrzeugen gewählt werden kann. Gleichzeitig lässt sich aus der vom Bundesamt für Strassen (ASTRA) veröffentlichen Karte zur Anzahl von Unfällen mit Hauptursache Geschwindigkeit im Jahr 2017 ableiten, dass ländlich geprägte Kantone, wie z.B. Bern, Wallis oder Graubünden, relativ zur Wohnbevölkerung deutlich höhere Unfallzahlen haben als Kantone mit dichterer Siedlungsstruktur (Bundesamt für Strassen (Astra), 2018). Ebenso weisen eher ländlich geprägte Kantone einen jeweils höheren Anteil an Getöteten auf. Obwohl in dieser Analyse ein Unterschied zwischen den Kantonen bezüglich der Fahrleistung im motorisierten Individualverkehr (MIV) nicht berücksichtigt wird, kann die Hypothese abgeleitet werden, dass schwere Unfälle mit Hauptursache Geschwindigkeit besonders häufig auf Strassen ausserorts auftreten, für die in der Regel eine Geschwindigkeitsbeschränkung von 80 km/h gilt.

Trotz der Bedeutung für eine präzise Planung und Projektierung wurden die Wirkungszusammenhänge zwischen Gestaltungselementen und gefahrener Geschwindigkeit noch nicht systematisch untersucht. Die geplante Forschungsarbeit zielt darauf ab, diese Forschungslücke zu schliessen und die Wirkung einzelner Gestaltungselemente auf die gefahrenen Geschwindigkeiten mit einer Kombination von Feld- und Laborforschung zu quantifizieren.

1.2 Stand der Forschung

Aufgrund der zentralen Bedeutung für die Verkehrssicherheit, den Verkehrsfluss sowie die Aufenthaltsqualität ist die Untersuchung der Geschwindigkeitswahl ein etablierter Forschungszweig. Der Strassenverkehr ist ein komplexes soziales System. Zahlreiche frühere Untersuchungen zeigen, dass die Geschwindigkeitswahl von einer Vielzahl von Faktoren abhängt. Zwei Forschungsrichtungen lassen sich dabei differenzieren: Untersuchungen zur Gestaltung des Strassenraums sowie der Einfluss der Eigenschaften der Autolenkenden. In der Folge wird der aktuelle Stand der Forschung zur Messung der Geschwindigkeit erläutert.

1.2.1 Einflussfaktor Gestaltung des Strassenraums

Die Gestaltung des Strassenraums hat einen direkten Einfluss auf das Fahrverhalten und das Verkehrsgeschehen. Während die Dimensionierung früher primär nach der verkehrlichen Funktion für den MIV bestimmt wurde, erfolgen Strassenbaumassnahmen heute in der Regel ganzheitlicher und auf Basis von Verkehrs-, Betriebs- und Gestaltungskonzepten. Dementsprechend werden die Bedürfnisse weiterer Verkehrsteilnehmenden (zu Fuss Gehende, Radfahrende), die Verkehrssicherheit, die Lärm- und Emissionswirkung sowie die Anliegen der Anwohnerinnen und Anwohner und des lokalen Gewerbes den verkehrlichen Anforderungen gleichgestellt.

Das Konzept der selbsterklärenden Strassen ist die Grundlage für die Beeinflussung der Geschwindigkeit mittels Infrastruktur (Scaramuzza et al., 2016; Theeuwes & Horst, 2017) (vgl. Kapitel 2.2.2). Die Wirkung dieses Konzeptes kann mit dem Modell des Durchfahrtswiderstands ausgedrückt werden (Dietiker et al., 2009) (vgl. Abschnitt 2.2.3). Die Gestaltungselemente mit Wirkung auf die gefahrene Geschwindigkeit lassen sich auf Basis der Einordnung im Strassenraum differenzieren. Dabei wird zwischen Gestaltungselementen im (1) Fahrbereich (Fahrbahn und Park- resp. Radstreifen), (2) Fussgängerraum (Trottoirraum und Grünraum) und Gestaltungselementen im (3) Stadtraum unterschieden. Eine Übersicht zum Einsatz der in der Schweiz gebräuchlichen Gestaltungselemente (SN 40 212) findet sich in Eberling (2013). Verschiedene Forschungsarbeiten haben sich mit der Wirkung und Umsetzung der Konzepte der Durchfahrtsgeschwindigkeit (SVI Forschung 2004/057 «Wie Strassenraumbilder den Verkehr beeinflussen») und der selbsterklärenden Strassen (SVI 2016/006 «SERFOR: Self-Explaining and Forgiving Roads») in der Schweiz auseinandergesetzt.

Im Rahmen von Wirkungsanalysen von Tempo-30-Zonen, Begegnungszonen und anderen Umgestaltungen von Strassen wurden zahlreiche Geschwindigkeitsmessungen von

Planungsämtern in der Schweiz durchgeführt. Diese wurden aber bisher noch nicht zusammengezogen und gesamthaft ausgewertet.

1.2.2 Einflussfaktor Eigenschaften der Autolenkenden

Zusätzlich zur Strassenraumgestaltung beeinflussen verschiedene demographische und psychologische Eigenschaften der Autolenkenden die Geschwindigkeitswahl. Studien stimmen dahingehend überein, dass Männer im Allgemeinen schneller fahren als Frauen und dass junge Personen schneller fahren als ältere (Sadia et al., 2018). Weiter lassen sich unterschiedliche gewählte Fahrgeschwindigkeiten durch psychologische Faktoren wie Motivation, Gewohnheiten und persönlichen Komfort erklären (Ahie et al., 2015). Diese Faktoren sind für das geplante Projekt als Kontrollvariablen von Bedeutung.

1.2.3 Zusammenhang von Geschwindigkeit und Unfallschwere

Der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Unfallrisiko ist empirisch nachgewiesen (Niemann, 2020). Mit steigender Geschwindigkeit nehmen sowohl das Unfallrisiko als auch die Unfallschwere zu. Dieser Zusammenhang wird in der Literatur in der Regel auf Basis von zwei Modellen beschrieben: dem «Power model» nach Nilsson (siehe Cameron & Elvik, 2010) und dem «Exponential model» nach Finch (siehe Finch et al., 1994). Die Grundaussage bei beiden Modellen ist, dass bei steigender Geschwindigkeit das Unfallrisiko und die Unfallschwere nicht linear, sondern exponentiell zunehmen. So führt beispielsweise ein Geschwindigkeitsanstieg um 5 Prozent von 50 km/h auf 52.5 km/h zu einem Anstieg der Anzahl Getöteten um 31 Prozent.

1.2.4 Messung der Geschwindigkeitswahl

Radarmessungen sind in der Forschung und Praxis die gängigste Methode zur Messung der Geschwindigkeitswahl (Mackie, 2013; Reagan et al., 2013). Solche Feldstudien zeichnen sich dabei durch eine hohe externe Validität aus. Doch der Einsatz von Messungen ist mit Einschränkungen verbunden: Rückschlüsse auf die Interaktion zwischen der Infrastruktur und den Eigenschaften der fahrenden Person sind nur sehr bedingt möglich. Zudem können in Feldstudien Kontextfaktoren und Infrastruktur nur bedingt variiert werden. Dadurch ist keine evidenzbasierte Aussage des Einflusses von noch nicht existierender Infrastruktur möglich. Weiter erlauben Radarmessgeräte nur eine Messung der Geschwindigkeit an einem Querschnitt, wodurch keine Aussage zur Stetigkeit der Geschwindigkeitswahl getroffen werden kann. Diese Einschränkungen der Messung mittels Radarmessgeräten können mittels des Einsatzes eines Virtual-Reality (VR)-Fahrsimulators behoben werden.

Eine weitere Möglichkeit stellt die fahrzeugbasierte Messung dar. Dabei wird die gefahrene Geschwindigkeit entweder mittels Bordelektronik oder basierend auf GPS-Daten (z.B. TomTom Street Profiles[1]) aufgezeichnet und anschliessend durch eine geeignete Verortung mit den Streckeneigenschaften verknüpft. Diese Messmethode zeichnet sich durch eine hohe Validität aus. Allerdings sind solche Erhebungen aufwendig. Für die Messung auf spezifischen Strecken ist insbesondere die Rekrutierung und Betreuung der Probanden zeitintensiv, und die Kontextfaktoren und die Infrastruktur können nur bedingt variiert werden. Weiter zeigt sich bei passiv erhobenen GPS-Daten das Problem, dass für eine solche Anwendung Einzelmessungen benötigt werden. Kommerzielle Anbieter (z.B. TomTom) bieten jedoch nur aggregierte Daten an. Mit eigenen Messungen hingegen wäre es sehr aufwendig, die notwendigen Datenpunkte zu sammeln, um valide Aussagen über einzelne Strecken machen zu können.

Der Einsatz von Fahrsimulatoren hat sich sowohl in der Wissenschaft als auch in der Praxis etabliert. Zahlreiche Studien untermauern die Validität von Fahrsimulatoren als

[1] https://www.tomtom.com/lib/doc/licensing/l.SP.EN.pdf

zuverlässiges Messinstrument zur Untersuchung von Fahrverhalten (Allen et al., 2017; Kaptein et al., 1996).

Ein zentraler Grund für die Etablierung von Fahrsimulatoren in der Praxis ist die Tatsache, dass deren Einsatz sicher ist (H. C. Lee, Lee, et al., 2003). Aus wissenschaftlicher Perspektive spricht die Möglichkeit einer kontrollierten experimentellen Manipulation der relevanten Einflussfaktoren (z.B. Strassenraumgestaltung) und die damit einhergehende systematische Untersuchung derer kausalen Auswirkungen auf das Fahrverhalten (Carsten & Jamson, 2011; Kaptein et al., 1996) ebenfalls für die Nutzung von Fahrsimulatoren. Darüber hinaus ergeben sich weitere Vorteile aus der Kontrolle von Umweltfaktoren wie Verkehr, Wetter und Standort.

VR bietet sich aus verschiedenen Gründen für den Einsatz mit Fahrsimulatoren an. Durch die rasante technische Weiterentwicklung in den vergangenen Jahren fanden enorme Fortschritte in der VR-Industrie statt. Nutzende können mithilfe von stereoskopischen VR-Brillen (Head-Mounted Displays; HMD) ihren Blickwinkel jederzeit verändern und entgehen damit den Restriktionen traditioneller fest installierter Anzeigetechnologien (Stoner et al., 2011). Zusätzlich werden durch die geschlossene Bauweise von VR-Brillen äussere Reize minimiert und somit wird die Immersion erhöht (Jerald, 2016). VR-Brillen der neuesten Generation verfügen über einen höheren Tragekomfort, sind leistungsfähiger und verfügen über bessere Displaytechnologien (Bennett et al., 2016). Seit der Verfügbarkeit der neuen VR-Brillen wurden demnach bereits vereinzelt Fahrsimulatorstudien zur Untersuchung ihres Nutzens durchgeführt. Es zeigt sich, dass Probanden VR-Fahrsimulatoren gegenüber herkömmlichen Fahrsimulatoren bevorzugen (Walch et al., 2017) und mit neuen VR-Brillen eine bessere Fahrleistung und Immersion erzielt werden kann (Ricaud et al., 2015; Weidner et al., 2017). Ähnliche Ergebnisse, die für den Einsatz von VR mit Fahrsimulatoren sprechen, zeigten sich ebenfalls in einer von der FHNW durchgeführten Studie (Kaufmann, 2017). In dieser Studie wurde mithilfe eines VR-Fahrsimulators die Fussgängererkennung durch Autofahrende untersucht. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Kosten von VR-Brillen nur einen Bruchteil eines herkömmlichen Projektionssystems betragen.

1.3 Forschungslücken, Forschungsfragen und Begründung der Methodenwahl

Bisherige Forschungsarbeiten haben die Erfahrungen in Bezug auf die Wirkung von Temporeduktionen in Begegnungszonen gesammelt und dokumentiert (Graf et al., 2017; Steiner et al., 2013). Dabei wurde aber erkannt, dass die Frage, wie das Erscheinungsbild einer Begegnungszone konkret dazu beiträgt, dass Autolenkende erkennen, dass sie keinen Vortritt haben und maximal 20 km/h fahren dürfen, in weitergehenden Untersuchungen zu beantworten ist.

Neuere Forschungsarbeiten (EKLB, 2015; Grolimund und Partner, 2017) sowie zahlreiche Wirkungsanalysen nach der Einführung von Tempo-30-Zonen dokumentieren die Wirkungszusammenhänge zwischen den gefahrenen Geschwindigkeiten und verschiedenen Gestaltungsvarianten in der Schweiz .

Auf Hauptverkehrsstrassen innerorts gilt in der Regel eine Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h, wobei die Geschwindigkeit oft aufgrund der Verkehrsbelastung, respektive der dichten Folge von Kreuzungen und LSA (Lichtsignalanlagen), nicht frei gewählt werden kann. Gleichzeitig unterscheiden sich diese Strassen teilweise bezüglich ihrer Gestaltungselemente deutlich. Es fehlt aber an Messungen (zu Zwischenzeiten), die es erlauben würden, diesen Wirkungszusammenhang besser zu verstehen. In vielen Städten besteht aber das Bedürfnis, die Geschwindigkeit auch auf Hauptverkehrsstrassen von 50 auf 30 km/h zu reduzieren. Während sich dabei eine Vielzahl von gestalterischen Möglichkeiten anbieten, wurden in der Praxis bisher nur wenige Beispiele umgesetzt (z.B. in Wabern). Zugleich gibt es immer mehr Bestrebungen, innerorts auch auf Hauptverkehrsstrassen Tempo 30 zu realisieren, wobei sich eine grosse Vielfalt an Gestaltungselementen anbietet. Es ergibt sich somit Forschungsbedarf hinsichtlich der Wirkung von Gestaltungselementen auf die Geschwindigkeitswahl bei Hauptverkehrsstrassen mit Höchstgeschwindigkeit 30 km/h. Aktuell wurde in der Schweiz wenig Erfahrung mit diesen Strassentypen gesammelt. Aus

diesem Grund bietet der Einsatz eines VR-Fahrsimulators den weiteren Vorteil, dass die Wirkung alternativer Gestaltungselemente getestet werden kann.

Strassen mit Tempo 80 kommen auf den Hauptverkehrsachsen zwischen den Agglomerationen und im ländlich geprägten Raum zum Einsatz. Zu den Auswirkungen von Gestaltungselementen auf diese spezifischen Strassengegebenheiten gibt es kaum Literatur. Daher besteht ein Bedarf an Messungen sowie einem VR-Experiment, um die grundsätzlichen Wirkungszusammenhänge zu eruieren.

Vor diesem Hintergrund zielt das geplante Forschungsprojekt darauf ab, die folgenden Forschungsfragen zu beantworten:

1. Welche bestehenden Gestaltungselemente beeinflussen die Geschwindigkeitswahl für verschiedene Strassentypen gemäss der bisherigen Forschung am effektivsten?
2. Was ist der quantifizierbare Einfluss von in der Schweiz bereits eingesetzten Gestaltungselementen auf die Geschwindigkeitswahl innerorts für folgende Strassentypen?
    a. Begegnungszone, wohnorientiert
    b. Tempo-30-Zone
    c. Hauptverkehrsstrasse innerorts mit Tempo 30
    d. Hauptverkehrsstrasse innerorts mit Tempo 50
3. Was ist der quantifizierbare Einfluss von verschiedenen, teilweise in der Schweiz heute noch nicht eingesetzten Gestaltungselementen auf die Geschwindigkeitswahl für folgende Strassentypen?
    a. Hauptverkehrsstrasse innerorts mit Tempo 30
    b. Hauptverkehrs- oder Verbindungsstrasse ausserorts mit Tempo 80

Das Forschungsprojekt basiert auf einem *Mixed-Methods*-Ansatz. Hierzu werden bestehende Daten aus Geschwindigkeitsmessungen mit Daten aus neuen Geschwindigkeitsmessungen sowohl im Feld als auch in einem VR-Experiment kombiniert. Forschungsfrage 1 wird auf Basis einer Literaturrecherche beantwortet. Forschungsfrage 2 wird mittels Feldmessungen (bestehende und neue Messungen) beantwortet. Forschungsfrage 3 wird auf Basis eines Experiments mit einem VR-Fahrsimulator beantwortet. Tab. 1 gibt einen Überblick über die geplanten Messmethoden für den jeweiligen Strassentyp und begründet die Methodenwahl.

***Tab. 1** Überblick über Methodenwahl*

Strassentyp	VM	MF	VR-E	Begründung
Begegnungszone, wohnorientiert	**X**			Datengrundlage in Gemeinden vorhanden
Tempo-30-Zone	**X**			Viel Erfahrung und gute Datengrundlage vorhanden
Hauptverkehrsstrasse mit Tempo 30	**X**	**X**	**X**	Dünne vorhandene Datengrundlage; wenig Erfahrung/vorhandene Gestaltungselemente im Feld; Gestaltungsmöglichkeit in VR; hohe Relevanz innerorts
Hauptverkehrsstrasse mit Tempo 50	**X**	**X**		Viel Erfahrung und gute Datengrundlage vorhanden
Strasse mit Tempo 80 (ausserorts)			**X**	Dünne vorhandene Datengrundlage; wenig Erfahrung/vorhandene Gestaltungselemente im Feld; Gestaltungsmöglichkeit in VR

Anmerkungen: VM = Vorhandene Messungen; MF = Messungen im Feld: VR-E = VR-Fahrsimulatorexperiment

1.4 Arbeitspakete im Überblick und Aufbau des Berichts

Abb. 1 zeigt das Vorgehen auf Basis von sieben Arbeitspaketen. In Arbeitspaket 1 (AP1) wird durch eine Literaturanalyse bestehendes Wissen zum Einfluss von Gestaltungselementen auf die Geschwindigkeitswahl aufgearbeitet. Die Ergebnisse werden im zweiten Kapitel dargestellt.

In AP2 werden die Resultate bereits erhobener Geschwindigkeitsmessungen von verschiedenen Ämtern zusammengetragen und kontextualisiert. Zusätzlich werden 16 neue Messungen für Strassentypen, Gestaltungselemente in Tempo-30- und Tempo-50-Strassen durchgeführt, für die bisher keine Geschwindigkeitsdaten vorliegen. Die Ergebnisse werden im dritten Kapitel zusammengefasst.

Weiter wird die Wirkung von bestehenden und neuen Gestaltungselementen auf die Geschwindigkeitswahl bei Hauptverkehrsstrassen mit Tempo 30 und Tempo 80 basierend auf Experimenten mit einem VR-Fahrsimulator ermittelt: Die Arbeiten werden aufgeteilt in drei Arbeitspakete umgesetzt: In AP3 wird der Versuchsplan mit dem detaillierten experimentellen Design auf Basis der interdisziplinären Kompetenzen aus dem Projektteam entwickelt. In AP4 erfolgt die Strassenraumgestaltung mittels 2D-Plänen für die in AP3 ausgewählten Kombinationen von Gestaltungselementen. In AP5 werden diese Pläne für die 3D-Simulation modelliert. Das eigentliche Experiment erfolgt in AP6. Die Ergebnisse aus diesen Arbeitspaketen werden in Kapitel 4 erläutert.

In AP7 erfolgt die Zusammenfassung der Ergebnisse in einem Schlussbericht sowie in einem SVI-Merkblatt. Die Gesamtergebnisse werden in Kapitel 5 zusammengefasst und diskutiert.

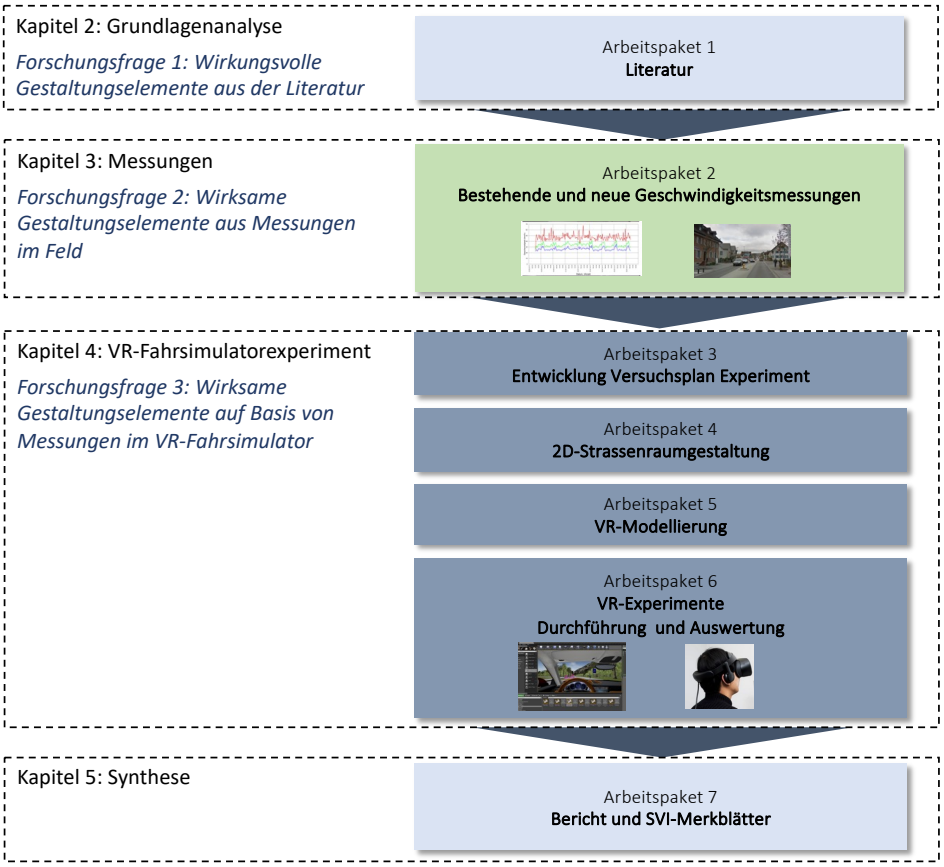


***Abb. 1** Inhalt und Ablauf der Arbeitspakete im Überblick*

2 Grundlagenanalyse: Strassenraumgestaltung und Geschwindigkeitswahl

2.1 Einführung und Aufbau des Kapitels

Im zweiten Kapitel werden die Grundlagen des vorliegenden Forschungsprojektes auf Basis einer Literaturrecherche aufgearbeitet. In Abschnitt 2.2. werden Erklärungsansätze für den Zusammenhang zwischen der Strassenraumgestaltung und der Geschwindigkeitswahl erläutert. In Abschnitt 2.3. werden methodische Aspekte der Geschwindigkeitsmessung beleuchtet. Dabei werden verschiedene Kennzahlen und Methoden zur Geschwindigkeitsmessung evaluiert. In Abschnitt 2.4 wird die nationale und internationale Literatur zum empirisch erhobenen Einfluss der Strassenraumgestaltung auf die Fahrgeschwindigkeit zusammengefasst. Ergebnis dieser Zusammenfassung ist eine Zusammenstellung der Gestaltungselemente, welche gemäss der bisherigen Forschung effektiv zu einer Geschwindigkeitsreduktion führen. Damit dient das Kapitel der Beantwortung der ersten Forschungsfrage: *Welche bestehenden Gestaltungselemente beeinflussen die Geschwindigkeitswahl für verschiedene Strassentypen gemäss der bisherigen Forschung am effektivsten?*

2.2 Erklärung des Zusammenhangs von Fahrgeschwindigkeit und Strassenraumgestaltung

Verschiedene Ansätze befassen sich mit dem Einfluss der Strassengestaltung auf die gefahrene Geschwindigkeit. In diesem Abschnitt werden zuerst die grundlegenden psychologischen Prozesse, welche den Zusammenhang zwischen Strassenraumgestaltung und Fahrgeschwindigkeit erklären, erläutert. Anschliessend wird das Konzept der selbsterklärenden Strassen erläutert und mit dem «Durchfahrtswiderstand» eine konkrete Anwendung des Konzepts dargelegt.

2.2.1 Psychologische Prozesse

Gemäss Elliott et al. (2003) greift eine Interpretation, dass Strassenraumgestaltung und Geschwindigkeit direkt miteinander gekoppelt sind, zu kurz. Vielmehr wird die Geschwindigkeit durch eine Vielzahl von psychologischen Prozessen beeinflusst, die erklären können, warum die Strassenraumgestaltung die gewählte Fahrgeschwindigkeit beeinflusst:

1. Zunehmende kognitive Belastung: Die kognitive Belastung bezieht sich auf die Komplexität des Befahrens einer Strecke oder eines Tores (z.B. bei der Einfahrt in eine Tempo-30-Zone). Die Erhöhung der Komplexität einer Strasse führt zu einer höheren kognitiven Belastung, was zu einer geringeren Geschwindigkeit führt, da die Autofahrenden mehr Informationen verarbeiten müssen.
2. Nutzen: Es wird schneller gefahren, wenn daraus ein Reisezeitgewinn entsteht und gleichzeitig mögliche negative Aspekte wie Stress, fehlender Komfort, Unfälle oder Strafverfolgung nicht oder weniger stark wahrgenommen werden. Dies entspricht dem wahrgenommenen Nutzen von (zu) schnellem Fahren. Um den wahrgenommenen Nutzen von (zu) schnellem Fahren zu reduzieren, kann die Strassenraumgestaltung den Gewinn durch (zu) schnelles Fahren verringern. Ebenfalls kann die Attraktivität von Seitenstrassen als Alternative für eine Hauptverkehrsachse (Schleichverkehr) reduziert werden.
3. Wahrgenommene Gefahren/Risiken: Die Risikotoleranz der Autofahrenden beeinflusst die Fahrgeschwindigkeit. Personen, die ein höheres Risiko tolerieren, neigen dazu, schneller zu fahren oder eine höhere Geschwindigkeit als sicher anzunehmen (Goldenbeld & van Schagen, 2007; Quimby et al., 1998). Die Strassenraumgestaltung kann die Einschätzung der Gefahr beeinflussen. Als wahrgenommene Risiken wirken zum Beispiel die aufgrund von Unfällen entstehenden Gefahren der

Fahrzeugbeschädigung, der Verletzung von Autofahrenden und/oder anderen Verkehrsteilnehmenden.

4. Retinal Streaming: Die Geschwindigkeitswahl basiert auf visuellen Hinweisen, welche es erlauben, die Geschwindigkeit wahrzunehmen. Die Bereitstellung von Objekten in der Peripherie des Sehens (vertikaler Kontrast) erhöht die wahrgenommene Geschwindigkeit, mit der sich eine Person bewegt.
5. Stress: Zunehmender Stress kann durch verschiedene Mechanismen zu einer niedrigeren, aber auch zu einer höheren Fahrgeschwindigkeit führen. Unter Stress kann dem Strassenverkehr weniger Aufmerksamkeit geschenkt werden.
6. Angst vor Strafverfolgung: Die Durchsetzung von Gesetzen über Geschwindigkeitsüberschreitungen ist ein wirksames Abschreckungsmittel gegen Geschwindigkeitsüberschreitungen. Massnahmen zur Strassenraumgestaltung, welche die Angst vor der Durchsetzung erhöhen, können die Fahrgeschwindigkeit verringern. Zu solchen Massnahmen gehören zum Beispiel Hinweise auf eine aktive Geschwindigkeitsmessung.
7. Bessere Kenntnis der eigenen Reisegeschwindigkeit: Mit der heutigen Fahrzeugtechnik ist es einfach, die gesetzliche Fahrgeschwindigkeit zu überschreiten, ohne dass dies aufgrund von Fahrgeräuschen oder anderen nicht-visuellen Indikatoren bemerkt wird. Die Autofahrenden können darüber im Fahrzeug oder auf der Strasse informiert werden.

2.2.2 Selbsterklärende Strassen

Die zentrale Idee der in der Literatur als «selbsterklärende Strassen» bezeichneten Art der Strassenraumgestaltung ist es, dass die Gestaltung des Strassenraums zur Wahl der Geschwindigkeit angemessene Informationen vermittelt.

Die Theorie setzt folgende Prozesse in den Vordergrund: (1) Kategorisierung und (2) Erwartung. Die Autoren stellen fest, dass bei bestimmten Strassen die Kategorisierung und die Erwartungen klar sind, wie zum Beispiel im Fall von Autobahnen. In anderen Fällen kann es zum Beispiel unerwartet sein, dass es langsamere Verkehrsteilnehmende gibt, die Wahrscheinlichkeit von entgegenkommendem Verkehr falsch eingeschätzt wird oder die angemessene Geschwindigkeit in Kurven nicht klar ist.

Einige Merkmale von selbsterklärenden Strassen sind (Übersetzung in Deutsch: Scaramuzza et al., 2016; Original: Theeuwes & Godthelp, 1995):

- Eindeutige Strassenelemente (homogen innerhalb einer Kategorie und unterscheidbar von allen anderen Kategorien)
- Eindeutiges Verhalten für eine bestimmte Kategorie (homogen innerhalb einer Kategorie und unterscheidbar von allen anderen Kategorien)
- Eindeutige Verhaltensweisen sollten mit eindeutigen Strassenelementen verknüpft werden können.
- Es sollten keine abrupten Übergänge von einer Strassenkategorie zur nächsten gemacht werden.
- Die spezifischen Eigenschaften der Strassenkategorie sollten auch in der Nacht sichtbar sein.
- Der Strassenentwurf sollte Geschwindigkeitsunterschiede und Unterschiede in der Bewegungsrichtung ausschliessen.
- Strassenelemente, Markierung und Signalisierung sollten den Standard der Sichtbarkeitskriterien erfüllen.

Scaramuzza et al. (2016) erwähnen, dass das ursprüngliche Konzept der selbsterklärenden Strassen nicht detailliert operationalisiert wurde. So wurde kein Versuch gemacht, grafisch darzustellen, wie die Mechanismen wirken. Nichtdestotrotz werden die theoretischen Überlegungen zu diesem Konzept angenommen. Aufgrund der nicht detaillierten Operationalisierung wurde der Begriff der selbsterklärenden Strassen unterschiedlich interpretiert.

Scaramuzza et al. (2016) zeigen den nötigen Handlungsbedarf, um in der Schweiz die Kriterien dieser Strassen zu erfüllen. Der Handlungsbedarf wird anhand einer Analyse von

bestehenden Verkehrsanlagen und VSS-Normen, Expertengesprächen sowie theoretischen Überlegungen (wie z.B. Anhaltequoten bei Fussgängerstreifen) aufgezeigt.

2.2.3 Durchfahrtwiderstand

Aus der Kombination von Erscheinungsbild, Nutzung und Verkehrsregelung von Strassenräumen entsteht der Durchfahrtwiderstand einer Strasse (Dietiker et al., 2009): Der Durchfahrtwiderstand wirkt sich über die individuelle Wahrnehmung einer Strasse sowie die Aufmerksamkeit auf die Fahrgeschwindigkeit aus.

Um den Durchfahrtwiderstand einer Strasse zu quantifizieren, haben Dietiker et al. (2009) ein Erhebungskonzept entwickelt, in dem Raumbilder, Einzelelemente im Strassenraum und Fahrverhalten miteinander verknüpft werden. Damit entwickelten sie ein Arbeitsinstrument, mit dem der Durchfahrtwiderstand basierend auf einem Zustandsbild einer Strasse bewertet und visualisiert werden kann. Ein Beispiel für die Visualisierung des Durchfahrtwiderstands ist in Abb. 2 zu sehen.

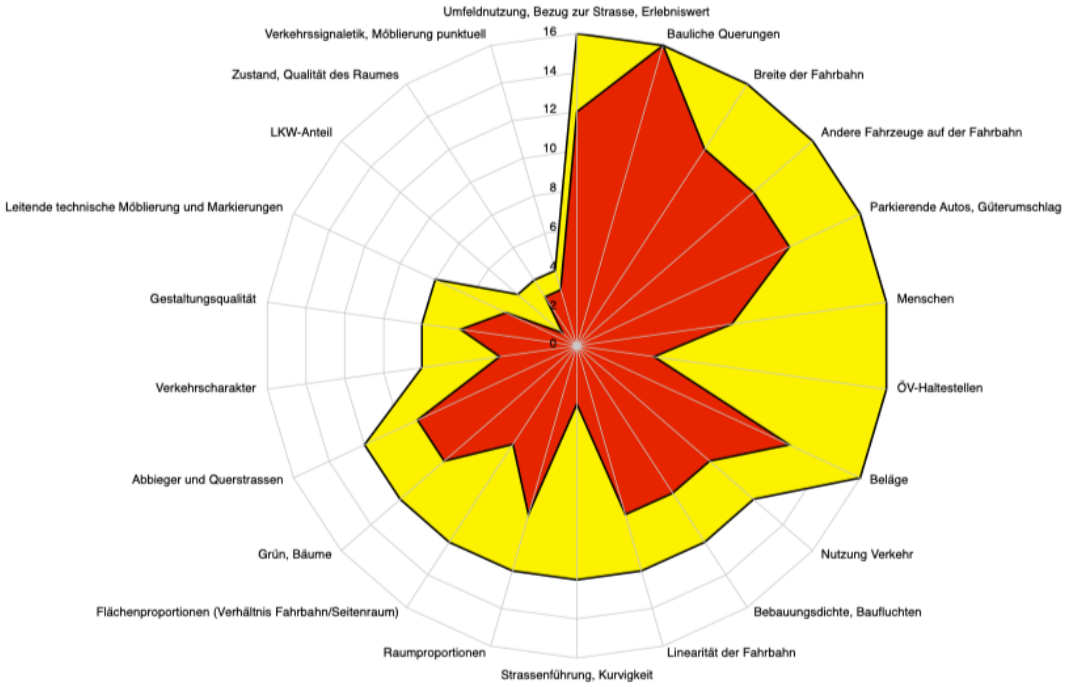


***Abb. 2** Durchfahrtwiderstands-Rose eines Strassenabschnitts (Dietiker et al., 2009)*

Die Indikatoren, die zur Bestimmung des Durchfahrtwiderstands verwendet werden, umfassen Fahrbahnbild, Raumbild und Nutzungsbild (nach Gewichtung geordnet, Dietiker et al., 2009):

- Umfeldnutzung, Bezug zur Strasse, Erlebniswert
- Bauliche Überquerungen und Gestaltungselemente (Fussgängerüberwege, Querungshilfen, vertikale/horizontale Versätze, Einengungen)
- Breite der Fahrbahn
- Andere Verkehrsteilnehmende auf der Fahrbahn (auch Radfahrende etc.)
- Parkierende Autos und Güterumschlag (kein Parkieren bis zum ständiges Ein- und Ausparkieren am Fahrbahnrand)
- Menschen (Anzahl von zu Fuss Gehenden auf dem Bild)

- ÖV-Haltestellen (Vorhandensein einer Haltestelle in Kombination mit der Häufigkeit des ÖV-Betriebs und Möglichkeit zum Überholen)
- Nutzung Verkehr (Trennung von Verkehrsflüssen)
- Bebauungsdichte (ohne Bebauung bis zur geschlossen Baulinie)
- Linearität der Fahrbahn (Absätze, Vorsprünge, Versätze, Erker etc.)
- Strassenführung (Kurvigkeit, Geradlinigkeit)
- Raumproportionen, Verhältnis zwischen Breite und Höhe
- Flächenproportion, Verhältnis zwischen Fahrbahn und Seitenraum
- Grün, Bäume
- Abbieger und Querstrassen
- Verkehrscharakter (Durchgangsverkehr vs. Ziel-/Quellverkehr)
- Gestaltungsqualität der Bauten
- Leitende technische Möblierung und Markierungen (Leitpfosten, Leitplanken, Ränder/Randsteine, Fahrbahnmarkierungen), variierend von «linear, sehr führend» bis zu «keine Randsteine, Kanten oder Markierungen»
- LKW-Anteil
- Zustand/Qualität des Raumes
- Verkehrssignale, Möblierung

Mehrere dieser Indikatoren sind eindeutig quantifizierbar und können z.B. mit Geschwindigkeitsmessungen in Verbindung gebracht werden. Andere Indikatoren variieren jedoch je nach Tageszeit und sind schwieriger zu erfassen.

2.2.4 Zwischenfazit zum Zusammenhang Strassenraumgestaltung und Geschwindigkeitswahl

Es gibt verschiedene Ansätze zur Erklärung des Zusammenhangs zwischen Strassenraumgestaltung und Geschwindigkeitswahl. Für die vorliegende Forschungsarbeit wird die Interaktion von Gestaltungselementen mit psychologischen Faktoren im Rahmen der VR-Fahrsimulatorexperimente miterhoben. Ebenfalls wird der Faktor der selbsterklärenden Strasse im Experiment mittels der Befragung erhoben. Somit gibt das Forschungsprojekt auch Einblick in die Wirkungsweise der Gestaltungselemente auf die gefahrene Geschwindigkeit.

2.3 Methoden der Geschwindigkeitsmessung

Zur Messung der Auswirkung der Strassenraumgestaltung auf die Fahrgeschwindigkeit wurde eine Reihe von Methoden eingesetzt. Diese Methoden werden in diesem Abschnitt beschrieben.

2.3.1 Messung der gefahrenen Geschwindigkeit im Feld

Kennzahlen

Das primäre Ziel dieser Forschung ist es, die Wirkung der Strassenraumgestaltung auf die gewählte Fahrgeschwindigkeit zu ermitteln. In Praxis und Forschung werden häufig Geschwindigkeitsmessgeräte eingesetzt, um mit Vorher- und Nachher-Messungen die Wirksamkeit von Strassenraumgestaltungselementen zu bewerten. Abb. 3 zeigt eine typische Auswertung einer solchen Geschwindigkeitsmessung. Die Methode umfasst die folgenden Kenngrössen zur Geschwindigkeit:

- v_{min}: Die während der Messperiode beobachtete Mindestgeschwindigkeit
- v_{max}: Die während der Messperiode beobachtete Höchstgeschwindigkeit
- $v_{50,\ 85}$: Die Geschwindigkeit, mit der 50 Prozent bzw. 85 Prozent der Fahrzeuge den Messquerschnitt durchfahren. Die Angabe anderer Perzentile ist aufgrund der Rohdaten auch möglich.
- v_{avg}, $v_{mittelwert}$: Die von den Fahrzeugen während der Messperiode gefahrene Durchschnittsgeschwindigkeit

Zusätzlich ist die Anzahl der Beobachtungen (Messungen) pro Fahrtrichtung, die Anzahl der Lastwagen und die Anzahl der Motorräder gegeben. In einigen Fällen enthalten die Geschwindigkeitsmessungen auch die Anzahl der Velos.

Wenn eine ausreichende Datengrundlage besteht, ist es möglich, die verschiedenen Geschwindigkeitsmessungen nach Tageszeit aufzuteilen (z.B. Stosszeit, tagsüber, nachts).

Bei den für diese Studie relevanten Geschwindigkeitsmessungen handelt es sich in der Regel um externe Querschnittsmessungen: Je nachdem, welcher Standort gewählt wird, können aufgrund einer anderen Konstellation von Einflussfaktoren andere Messwerte resultieren. Die Messungen erfolgen jeweils mit elektromagnetischen Wellen, entweder mit Radar (Mikrowellen) oder Lidar (Licht).

Navigationsanbieter wie TomTom und Here erfassen mit ihren Softwares die gefahrenen Geschwindigkeiten zunehmend nicht nur über gesamte Fahrten hinweg, sondern auch über einzelne Streckenabschnitte, und bieten daher eine neue Art von Datenquellen.

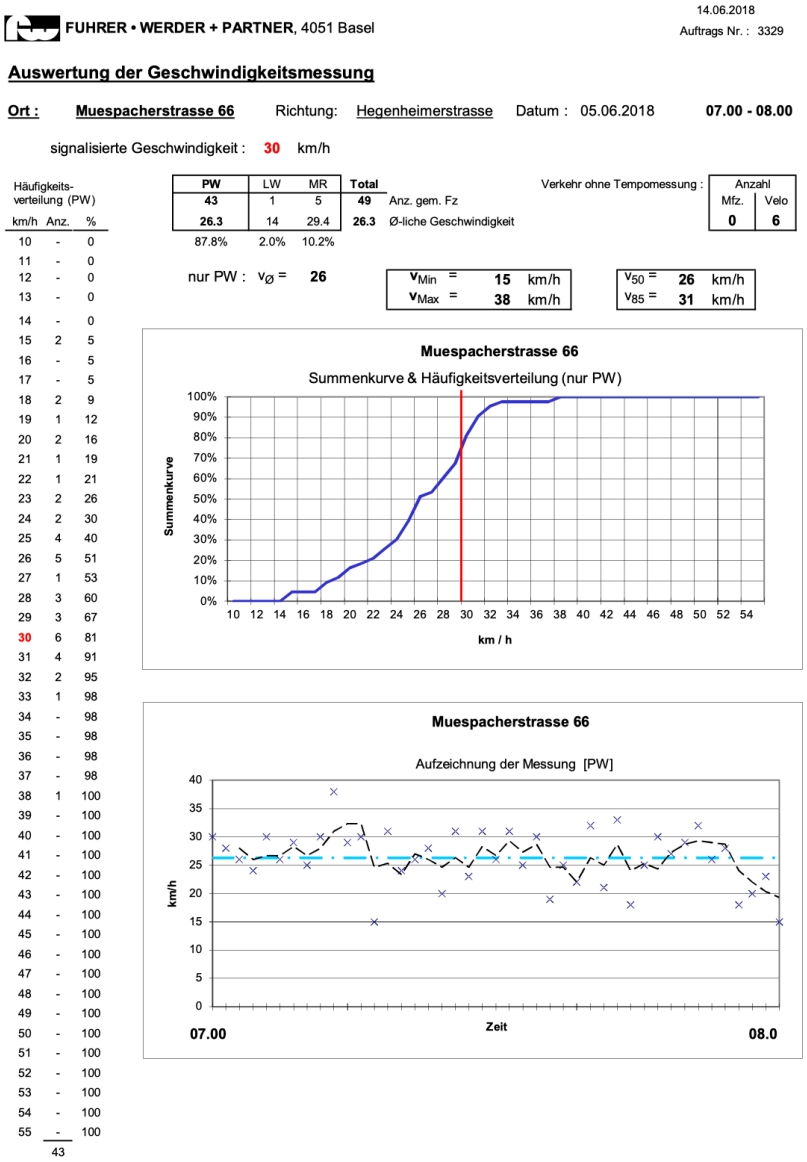


***Abb. 3** Auswertung der gefahrenen Geschwindigkeit: Standard-Messbericht eines Seitenradars*

Messungen im Rahmen von Wirkungsanalysen

Eine der häufigsten Anwendungen für Messungen der Fahrgeschwindigkeit ist die Wirkungsanalyse. Dabei wird die gefahrene Geschwindigkeit an einem bestimmten Standort vor und nach der Umgestaltung des Strassenraums oder der Einführung einer Massnahme gemessen. Die Wirksamkeit wird aufgrund der beobachteten Verringerung der gemessenen Geschwindigkeit bestimmt. Ein typisches Beispiel ist die Messung der Geschwindigkeitsreduktion, die durch eine Intervention erreicht wurde (siehe Schwarz et al., 2010).

Anstatt die Fahrgeschwindigkeit auf einer Strasse vor und nach einem gestalterischen Eingriff zu messen, ist es auch möglich, die Fahrgeschwindigkeit auf ähnlichen Strassen mit und ohne Veränderung der Strassenraumgestaltung zu messen. Parallel zu einer Intervention an einer Strasse wird die Geschwindigkeit an ähnlichen, nicht veränderten Strassen gemessen. Zusätzliche Messungen können bei der Kontrolle von Gesamtveränderungen in einem Gebiet helfen, die sich z.B. aufgrund von Wetter, Jahreszeit, Ferienzeiten oder aus anderen Gründen ergeben können (siehe Goldenbeld et al., 2017; Ullman & Rose, 2005; Wrapson et al., 2006). In diesem Fall wird die Wirksamkeit des Strassenentwurfs daran gemessen, wie stark sich die Geschwindigkeit an allen gemessenen Strassen ändert. Wenn sich die Geschwindigkeit auf der Strasse mit einer Intervention stärker ändert, wird die Intervention als wirksam beurteilt.

Schliesslich messen mehrere Studien die Geschwindigkeit über einen längeren Zeitraum hinweg oder in regelmässigen Abständen, um festzustellen, ob die Geschwindigkeitsreduktion dauerhaft ist. Geschwindigkeitsmessungen können auch in unterschiedlichen zeitlichen Abständen von der Intervention stattfinden, um zu bestimmen, wie lange der Effekt anhält.

Goldenbeld et al. (2017) untersuchten die Wirkung einer neuen Art von thematischen Schildern (Abb. 4) entlang von städtischen Strassen in den Niederlanden. Sie massen die Veränderung der Geschwindigkeit entlang der Strasse und anderer umliegender Strassen, um festzustellen, ob es eine Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit gab.

Abb. 4 *Thematisches Schild (Goldenbeld et al., 2017)*

Vergleichsmessungen entlang mehrerer Strecken

Es gibt eine Reihe von Studien, welche die Geschwindigkeit entlang einer Reihe von Strassen bewerten. Es können zwei Arten von Studien unterschieden werden.

Die erste Art betrifft Studien, welche die Fahrgeschwindigkeit auf verschiedenen Strassen messen und den Zusammenhang zwischen Strassenraumgestaltung und Fahrgeschwindigkeit mit statistischen Modellen analysieren. Beispielsweise haben Gargoum et al. (2016) die Geschwindigkeit entlang von 600 Strassenabschnitten auf städtischen Strassen in Kanada gemessen und die Auswirkungen von Signalisation der Geschwindigkeit, Vorhandensein eines Seitenstreifens, Vorhandensein von Fussgängerübergängen, Anzahl der Fahrstreifen, Umfeldnutzung und Wetter auf die Fahrgeschwindigkeit bewertet. Fitzpatrick et al. (2001) massen die Fahrgeschwindigkeit auf 55 Strassenabschnitten in den USA auf Vorstadtstrassen und untersuchten den Zusammenhang zwischen Fahrgeschwindigkeit und Fahrbahnbreite, ausgewiesenen Geschwindigkeitsbegrenzungen, Gelände und Steigung.

Die zweite Art von Studien bietet eine deskriptive Analyse der Fahrgeschwindigkeit und der Elemente der Strassenraumgestaltung. So untersuchten Schwarz et al. (2010) die Beziehung zwischen verschiedenen Arten von Strassenbauelementen in der Schweiz in Bezug auf die Schallemissionen und die Fahrgeschwindigkeit auf Tempo-30-Strassen (hauptsächlich Erschliessungstrassen). Häfliger et al. (2019) bewerteten die Geschwindigkeit auf 18 Abschnitten von Hauptverkehrsstrassen in der Schweiz, auf denen Tempo 30 eingeführt wurde.

2.3.2 Experiment

Naturalistische Methode

Mit naturalistischen Methoden wird versucht, das natürliche Verhalten von Probanden in alltäglichen Situationen aufzuzeichnen. Zum Beispiel untersuchte De Waard (1995) die Wahl der Geschwindigkeit auf ländlichen Strassen in den Niederlanden. Dabei wurde die gewählte Geschwindigkeit mit einem instrumentierten Fahrzeug kontinuierlich aufgezeichnet.

Simulatorexperiment

In einem Simulatorexperiment durchfahren Probanden mit Hilfe eines Fahrsimulators eine virtuelle Umgebung. Virtuelle Umgebungen können entweder eine bestehende Umgebung (Galante et al., 2010) oder eine imaginäre Umgebung mit einer Reihe von speziell für die Fragestellung ausgesuchten Gestaltungselementen darstellen (siehe Molino, 2009; Taylor et al., 2002).

Der Einsatz von Fahrsimulatoren hat sich sowohl in der Wissenschaft als auch in der Praxis etabliert. Zahlreiche Studien untermauern die Validität von Fahrsimulatoren als zuverlässiges Messinstrument zur Untersuchung des Fahrverhaltens (Allen et al., 2017; Kaptein et al., 1996).

Ein zentraler Grund für die Etablierung von Fahrsimulatoren in der Praxis ist die Tatsache, dass deren Einsatz sicher ist (H. C. Lee, Lee, et al., 2003). Aus wissenschaftlicher Perspektive liegen die Gründe für die Nutzung von Fahrsimulatoren in der Möglichkeit einer kontrollierten experimentellen Manipulation der relevanten Einflussfaktoren (z.B. Strassenraumgestaltung) und damit einer systematischen Untersuchung derer kausalen Auswirkungen auf das Fahrverhalten (Carsten & Jamson, 2011; Kaptein et al., 1996). Darüber hinaus ergeben sich weitere Vorteile aus der Kontrolle von Umweltfaktoren wie Verkehr, Wetter und Standort.

Virtual Reality (VR) als Alternative zu Messungen bietet sich aus verschiedenen Gründen für den Einsatz mit Fahrsimulatoren an. Durch die rasante technische Weiterentwicklung in den vergangenen Jahren fanden enorme Fortschritte in der VR-Industrie statt. Nutzende können mithilfe von stereoskopischen VR-Brillen (Head-Mounted Displays; HMD) ihren Blickwinkel jederzeit verändern und entgehen damit den Restriktionen traditioneller fest installierter Anzeigetechnologien (Stoner et al., 2011).

Weiter werden durch die geschlossene Bauweise von VR-Brillen äussere Reize minimiert, was die Immersion weiter erhöht (Jerald, 2016). VR-Brillen der neuesten Generation verfügen über einen höheren Tragekomfort, sind leistungsfähiger und verfügen über bessere Displaytechnologien (Bennett et al., 2016).

Seit der Verfügbarkeit der neuen VR-Brillen wurden demnach bereits vereinzelt Fahrsimulatorstudien zur Untersuchung ihres Nutzens durchgeführt. Es zeigt sich, dass Probanden VR-Fahrsimulatoren gegenüber herkömmlichen Fahrsimulatoren bevorzugen (Walch et al., 2017) und mit neuen VR-Brillen eine bessere Fahrleistung und Immersion erzielt werden kann (Ricaud et al., 2015; Weidner et al., 2017). Vergleichbare Tendenzen, die für den Einsatz von VR mit Fahrsimulatoren sprechen, konnten auch in einer von der FHNW durchgeführten Studie erkannt werden (Kaufmann, 2017).

2.3.3 Befragungen

Die Festlegung einer Geschwindigkeitsbegrenzung führt nicht immer dazu, dass sich die Autofahrenden an die Geschwindigkeitsbegrenzung halten. Über 40 Prozent der Autofahrenden fahren auf allen Strassenarten schneller als die ausgewiesenen Geschwindigkeitsbegrenzungen (Goldenbeld & van Schagen, 2007). Einer der Gründe für die Überschreitung der Geschwindigkeitsbegrenzung ist, dass die Autofahrenden die angegebene Geschwindigkeit nicht für «glaubwürdig» oder für «akzeptabel» und «realistisch» halten (Goldenbeld & van Schagen, 2007). Die Autofahrenden neigen dazu, sich auf ihr eigenes Urteil über die angemessene Geschwindigkeit für einen Strassentyp zu verlassen; diese kann niedriger, aber auch höher als die ausgewiesene Höchstgeschwindigkeit sein. Darum ist es sinnvoll, Verkehrsteilnehmende nach der glaubwürdigen Geschwindigkeit zu befragen, statt zu evaluieren, ob die gesetzliche Geschwindigkeit eingehalten wird. Beispielsweise führten Goldenbeld und van Schagen (2007) eine Befragung durch und zeigten den Befragten eine Reihe von Strassenbildern, die eine Reihe von Unterschieden aufwiesen, wie z.B. das Vorhandensein einer Kurve, die Breite der Strasse, das Vorhandensein von Bäumen, die Anwesenheit von Vegetation und das Vorhandensein von Verkehr.

Dietiker et al. (2009) führten eine bildbasierte Umfrage durch, um den Durchfahrtwiderstand der Strasse zu ermitteln. Sie baten die Befragten, Elemente, die den Durchfahrtwiderstand einer Strasse erhöhen, zu benennen und in eine Rangordnung zu bringen. Darauf aufbauend entwickelten sie ein Instrument, mit dem sich der Widerstand einer Strasse berechnen lässt. Der Durchfahrtwiderstand wird am meisten durch die Breite der Fahrbahn, andere Fahrzeuge auf der Fahrbahn (inkl. Velofahrende), parkierende Autos sowie Güterumschlag und Menschen beeinflusst.

Im Vergleich zu naturalistischen Methoden und Simulatorexperimenten haben Befragungen den Vorteil, dass eine grosse Anzahl von Befragten zu relativ geringen Kosten erreicht werden kann. Zudem können mit Befragungen psychologische Einflussfaktoren wie Risikoeinschätzungen und Verständlichkeit der Gestaltungselemente erhoben werden.

Der Nachteil ist, dass die Teilnehmenden nicht dem tatsächlichen Zustand ausgesetzt sind. Vielmehr geben sie ihr Urteil über eine angemessene Geschwindigkeit ab. Im Falle der städtischen Umgebung könnte diese Geschwindigkeit auf den Erwartungen der ausgehängten Geschwindigkeitsbegrenzung basieren.

2.3.4 Zwischenfazit Methoden der Geschwindigkeitsmessung

Zur Gewährleistung der Validität werden für die vorliegende Forschungsarbeit verschiedene in diesem Abschnitt dargelegte Methoden der Geschwindigkeitsmessung verwendet.

Es gibt unterschiedliche Methoden, um eine mögliche Änderung in der Geschwindigkeit zu bestimmen. Die Änderung in der Geschwindigkeit wird immer relativ zu einer Referenz ausgedrückt. Bei der Auswertung von grossen Mengen von Geschwindigkeitsmessungen ist die Referenz häufig die Durchschnittsgeschwindigkeit aller Geschwindigkeitsmessungen, idealerweise von gleichen Strassen (Tempolimit, Funktion). Bei Simulatorstudien wird eine Änderung entweder relativ zu der Referenzstrecke oder zu der vorliegenden Strecke gemessen.

Gleichzeitig gibt es verschiedene Kennzahlen, um die gefahrene Geschwindigkeit auszuwerten. In der Praxis wird häufig die v_{85} verwendet, um die gefahrene Geschwindigkeit während einer bestimmten Zeitperiode zu bezeichnen. Diese Kennzahl ergibt sich aus der Geschwindigkeit, die von 85 Prozent der gemessenen Fahrzeuge eingehalten und von 15 Prozent überschritten wird. In der Forschung wird nicht immer erwähnt, welche Kennzahl verwendet wurde. Bei der Betrachtung der Literatur ist es wichtig herauszufinden, welche Kennzahl und welche Periode in der jeweiligen Studie verwendet wurde.

2.4 Strassenraumgestaltungselemente

2.4.1 Vorgehen für die Literaturrecherche zur Wirkung der Elemente der Strassenraumgestaltung

In einem ersten Schritt wurden die verschiedenen Elemente der Strassenraumgestaltung für die Hauptverkehrstrassen innerorts und ausserorts auf der Basis der in der Schweiz bestehenden Normen und Richtlinien gesichtet. Zusätzlich wurden die in Deutschland (RASt) und in den Niederlanden (ASVV) bestehenden Normen und Richtlinien überprüft. Die ausländischen Normen wurden verwendet, um zu sehen, ob und welche zusätzliche Gestaltungselemente aufgeführt sind, welche in der Schweiz nicht oder kaum genutzt werden.

Anschliessend wurde eine Online-Literaturrecherche durchgeführt. Die Suchmaschinen Google, Google Scholar und Science Direct wurden zu folgenden Suchbegriffen abgefragt:

- Road Design Speed; Road characteristics; Speed variability; Speed preference; Speed choice; Road characteristics,
- Strassenraumgestaltung Geschwindigkeit; Hauptverkehrsstrasse Geschwindigkeit,
- Evaluation von Geschwindigkeitsmassnahmen (*NL: Evaluatie snelheidsmaatregelen*), 30 km/h Zonen (30 km/u zonen)

Vor rund zwanzig Jahren wurden mehrere Reviews durchgeführt. Martens et al. (1997) und Elliott et al. (2003) beschreiben eine Vielzahl von Elementen der Strassenraumgestaltung und deren Auswirkungen auf die Fahrgeschwindigkeit. Häfliger et al. (2019) bieten eine Übersicht von Strassenraumgestaltungselementen und deren Anwendung auf Hauptverkehrsstrassen (HVS) mit Tempo 30. Diese Reviews wurden als Ausgangspunkt für die hier vorgestellte Literaturanalyse genutzt. Weiter wurden für die Literaturanalyse auch zahlreiche weitere Quellen und, sofern verfügbar, auch die Originaltexte der in den Reviews erwähnten Studien direkt berücksichtigt.

Die Ergebnisse aus der Literaturrecherche werden entlang der Einteilung des Strassenraums (vgl. Abb. 5) dargelegt.

Einteilung des Strassenraums und Übersicht

Für diese Übersicht wurde der Strassenquerschnitt in Abb. 5 als Grundlage verwendet. Weiter wurde dieser Leitfaden für die Beschreibung des Strassenraums als Grundlage bei der Erstellung des Versuchsplans verwendet.

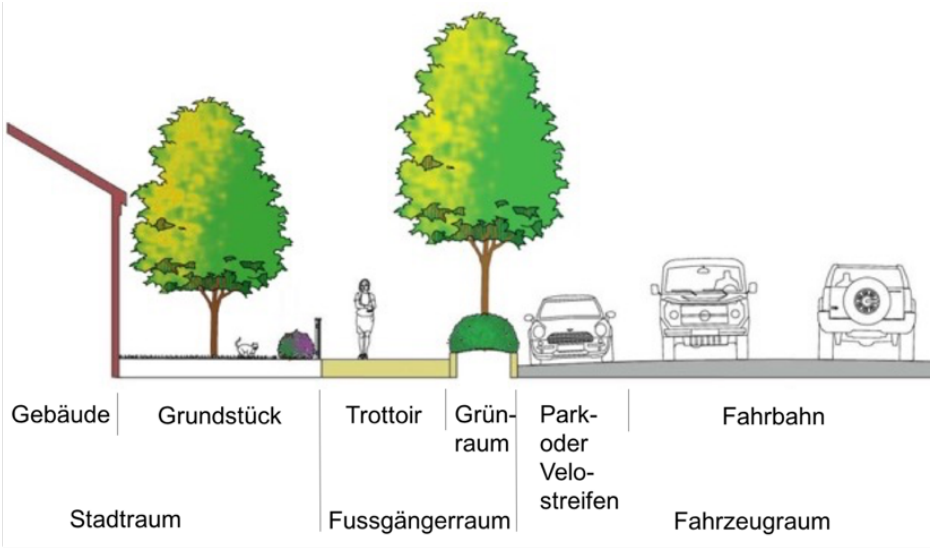


Abb. 5 *Leitfaden für die Beschreibung des Strassenraums*

2.4.2 Übersicht Gestaltungselemente

Nachfolgend werden die in der Literaturrecherche identifizierten Gestaltungselemente dargestellt, eingeordnet in die Bereiche des Strassenraums (vgl. Tab. 2).

***Tab. 2** Übersicht von Gestaltungselementen*

Raum	**Gestaltungselement**		**Geeignet für (bereits im Einsatz)**		**Wirkung (Wirkmechanismus)**
		P/K	Innerorts	Ausserorts	
Fahrbereich: Markierungen	Keine Trennung der Fahrstreifen	K	X (s)	X	(+) Komplexität und Risiko erhöht
	Trennung der Fahrrichtungen: Mehrzweckstreifen, Baulich gestaltete Trennstreifen	K	X (s)	X	(+/-)
	Seitenmarkierung: Seitenlinie/Leitlinie	K	X	X (s)	(-)
	Seitenmarkierung: Breite Bänder	K	X (s)	X (s)	(+/-) Wirkung nur in Kombination mit Mittelstreifen; Komplexität und Risiko erhöht
	Flächige Gestaltung	P	X (s)	X	(+/-)
Fahrbereich: Fahrbahn	Fahrstreifenbreite	K	X (s)	X	(+) Komplexität und Risiko erhöht
	Kreisel	P	X (s)	X (s)	(+)
	Mittelinsel mit/ohne Fussgängerstreifen, befahrbar/nicht-befahrbar	P	X (s)	X (s)	(+/-)
	Vertikaler Versatz: punktuelle Erhöhung der Fahrbahn	P	X (s)		(+) Reduziert Komfort; höhere Lärmemissionen
	Horizontaler Versatz und seitliche Einengungen: Unterbruch der Geradlinigkeit der Fahrbahn, entweder mit oder ohne Parkfelder	P	X (s)	X (s)	(+/-) Komplexität und Risiko erhöht
	Strassenbelag (glatte Strassenoberfläche)	K	X (s)	X (s)	(+) Höherer Komfort

Fortsetzung Tab. 2 *Übersicht von Gestaltungselementen*

	Randabschlüsse (weiche/Verzahnung)	K	X (s)		(+) unklar
Fahrbereich: Parkieren und Radstreifen	Radstreifen und Velostrassen	K	X (s)		(+) Komplexität und Risiko erhöht; wirken nur bei Einengung und anwesenden Velofahrenden
	Parkplätze	K	X (s)		(+) Komplexität und Risiko erhöht
Fussgängerraum	Grünraum	K	X (s)		(+/-) unklar
	Breites Trottoir	K	X (s)		(-) Verringerung des Risikos, da mehr Abstand
	Aufenthaltsmöglichkeiten	K	X (s)		(+) Erhöhung des Risikos, da andere anwesend
Stadtraum und Seitenraum	Grundstück: Setback (grössere Distanz vom Trottoir zum Gebäude)	K	X (s)		(-) Verringerung des Risikos, da mehr Abstand
Signalisation	Geschwindigkeitsangabe	P	X (s)	X (s)	(+) Wissen
	Thematisches Schild	P	X (s)	X (s)	(+/-) Wissen
	Distanztafeln (Countdown Zeichen)	P	X (s)	X (s)	(+) Wissen
	Digitale Geschwindigkeitsinformationen	P	X (s)	X (s)	(+/-) Wissen; soziale Normen

Anmerkung: P = punktuelle Massnahmen; K = kontinuierliche Massnahmen; (s) = im Einsatz in der Schweiz; Wirkung: (+) Reduktion der Geschwindigkeit/(-) Erhöhung der Geschwindigkeit; (+/-) unklare Ergebnisse

Punktuelle und kontinuierliche Massnahmen

Die in Tab. 2 dargestellten Elemente der Strassenraumgestaltung können als punktuelle Massnahmen oder als kontinuierliche Massnahmen klassifiziert werden. Punktuelle Massnahmen sind beispielsweise Tore bei Ortseinfahrten, Schwellen, Poller oder seitliche Einengungen. Kontinuierliche Massnahmen sind Mehrzweckstreifen, ein breites Band, Radstreifen oder die Fahrstreifenbreite. Die Auswirkungen kontinuierlicher versus punktueller Elemente werden in der Forschung separat gemessen.

2.4.3 Fahrbereich

Trennung der Fahrrichtungen

Es gibt verschiedene Arten von Strassenmarkierungen, um die Trennung des Verkehrs zwischen verschiedenen Fahrrichtungen zu kennzeichnen und den Autofahrenden eine Orientierungshilfe zu bieten. Es wurde viel Forschung über Fahrbahnmarkierungen für

nicht-städtische Strassen durchgeführt. Einerseits kann das Vorhandensein von Markierungen zu einer Verringerung der Geschwindigkeit führen, wenn die effektive oder die wahrgenommene Fahrbahnbreite reduziert wird. Andererseits kann die Trennung der eigenen Fahrbahn von entgegenkommenden Fahrzeugen zu einer höheren Geschwindigkeit führen, da sich die Autofahrenden weniger Sorgen machen müssen: Die Strasse führt zu einer geringeren kognitiven Belastung und zu einem geringeren wahrgenommenen Risiko. Der im englischsprachigen Raum verwendete Begriff "Median" (Trennstreifen oder Mittellinie) umfasst verschiedene Ausprägungen. Es kann sich entweder um eine Markierung, um eine bauliche Trennung (z.B. einen Mittelstreifen mit Leitplanken) oder um eine Trennung mittels Bäume oder Gras (Grünstreifen) handeln.

Angesichts der Vielfalt der Markierungen wurden unterschiedliche Auswirkungen beobachtet. Godley et al. (2004) bewerteten verschiedene «Mediane», die von regelmässigen Linien bis hin zu schraffierten «Medianen» auf einer 100-km/h-Strasse (ausserorts) variieren (Abb. 6). In ihrer Simulatorstudie stellten sie fest, dass eine regelmässige Mittellinie die Fahrgeschwindigkeit nicht verringert (es wurden verschiedene Breiten getestet). «Mediane» mit einem Schraffurmuster führten zu einer geringeren Fahrgeschwindigkeit. Charlton (2007) bewertete verschiedene Arten von Strassenmarkierungen auf Strassen ausserorts in Kombination mit Schildern in Kurven. Ein reliefartiger Mittelstreifen reduzierte die Fahrgeschwindigkeit in Kurven (der Fahrsimulator gab Bewegungs- und Audiofeedback bei diesen Markierungen); andere Arten von Markierungen (u.a. gestrichelte Mittellinien, eine doppelte Mittellinie und diagonale Markierungen) reduzierten die Geschwindigkeit nicht. Diagonale Markierungen reduzierten die Geschwindigkeit in Verbindung mit Pfeilschildern. De Waard et al. (1995) zeigten in einem Experiment mit einem instrumentalisierten Fahrzeug, dass ein reliefartiger Mittelstreifen zu tieferen Geschwindigkeiten auf Hauptverkehrstrassen ausserorts führt.

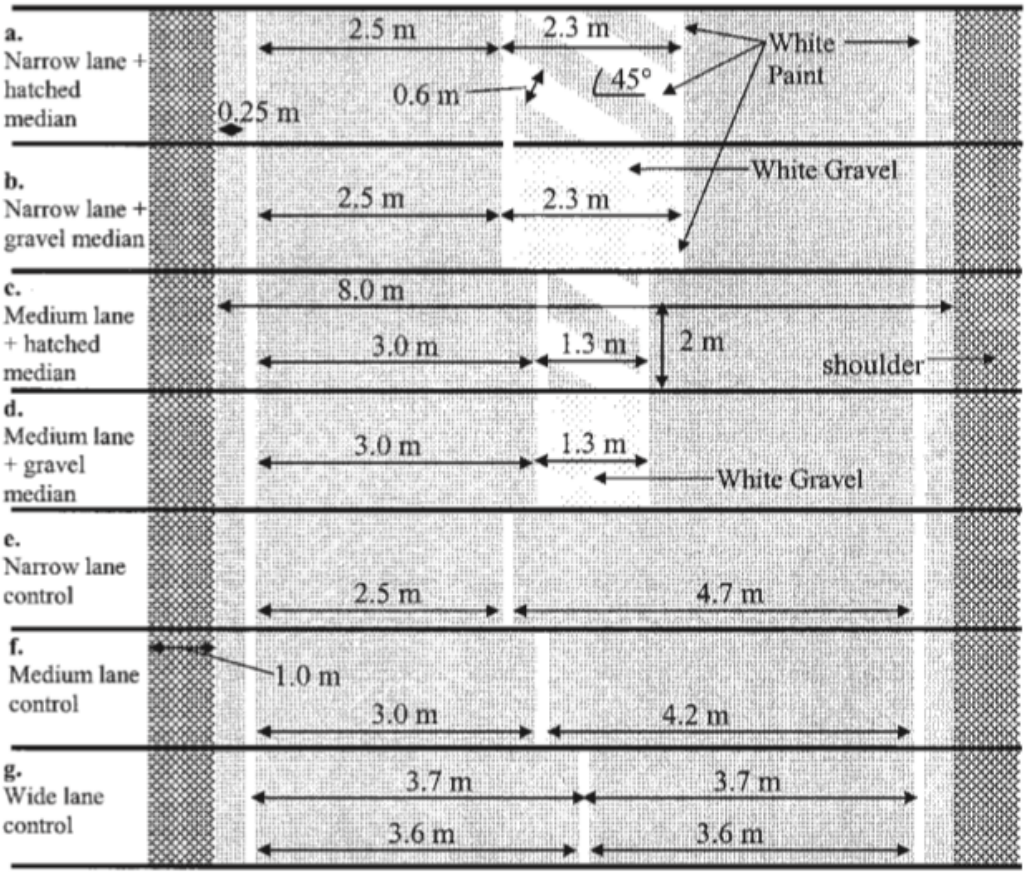


***Abb. 6** Beispiel von überprüften Mittellinien und Querschnitten auf einer 100-km/h-Strasse in Australien mittels eines Fahrsimulators (Godley et al., 2004)*

Taylor et al. (2002) zeigen, dass in einem Fahrsimulator ein farblich gestalteter Mittelstreifen mit Markierungen zu einer tieferen Geschwindigkeit auf einer Strecke ausserorts führt (Abb. 7, links). Die zusätzlichen Markierungen bewirken, dass die gefühlte Geschwindigkeit höher ist als die tatsächliche Geschwindigkeit.

Fitzpatrick et al. (2001) zeigten, dass ein «Median» zu einer höheren Geschwindigkeit auf Strassen innerorts führt. Gargoum et al. (2016) konnten auf Basis von Messungen nachweisen, dass ein «Median» entlang von Hauptverkehrstrassen ausserorts zu einer höheren Geschwindigkeit führt. Der Grund dafür ist, dass das wahrgenommene Risiko eines entgegenkommenden Autos nicht vorhanden ist. Bei beiden Studien wird die Gestaltung der Mediane nicht erwähnt.

Mehrzweckstreifen, wie sie in der Norm «Entwurf des Strassenraums – Mehrzweckstreifen» ausgearbeitet sind, haben verschiedene Zwecke (VSS, 2019b). Sie können als Querungselement für den Fuss-, Fahrrad- und Mofaverkehr dienen. Ausserdem können sie als Abbiegeelement für den Fahrrad- und Mofaverkehr verwendet werden.

Im Review von Elliot et al. (2003) werden mehrere Studien erwähnt, die berichten, dass die Entfernung der Mittellinie zu einer geringfügigen Verringerung der Fahrgeschwindigkeit führen kann.

Abb. 7 *Kontinuierliche Massnahme (links) und Torsituation (rechts) mit dem grössten Effekt bezüglich Geschwindigkeitsabnahme (Taylor, 2002)*

Flächige Gestaltung

Die farbliche Gestaltung des Strassenoberflächen (FGSO) ist festgehalten in der Norm «Entwurf des Strassenraums; Farbliche Gestaltung von Strassenoberflächen». Die Ausstattung einer Strasse mit einer anderen Farbe hat nicht das explizite Ziel, die Geschwindigkeit zu reduzieren (VSS, 2019a), sondern eine Ortsdurchfahrt zu gestalten oder einen besonderen Abschnitt hervorzuheben. Mit einer Einfärbung der Strasse kann das Bewusstsein und damit die kognitive Belastung erhöht und damit die Fahrgeschwindigkeit reduziert werden.

Taylor et al. (2002) testeten verschiedene flächige Gestaltungen als Tor zwischen Strassen ausserorts und innerorts. Signifikant ist nur die flächige Gestaltung (wie in Abb. 7, rechts) in Kombination mit Signalisation und Geschwindigkeitsangaben, welche zu einer Abnahme der Geschwindigkeit um 7.5 km/h führten. Drei gefärbte Bereiche mit einer raueren Oberfläche führen zu einer Abnahme um 4.8 km/h. Beschränkten sich hingegen die Massnahmen auf nur eine Bodenmarkierung, konnte keine Abnahme der Geschwindigkeiten bei Toren nachgewiesen werden.

Seitenmarkierungen und breite Bänder

Es gibt verschiedene Arten von Seitenmarkierungen. Die auf der Strasse verwendeten Linienmarkierungen (Randlinien) dienen der Führung der Autofahrenden und geben ihnen Informationen über ihre seitliche Position. Sie werden häufig ausserorts verwendet. Weitere Beispiele sind Markierungen, die auf Park- und Halteverbote hinweisen.

Die Seitenmarkierung kann auch zu einem breiten Band am Fahrbahnrand verbreitert und mit einer anderen Farbe (z.B. grün, rot) versehen werden. Dadurch werden ein anderes

visuelles Erscheinungsbild und eine andere Wirkung erzielt. Auf städtischen Strassen ist die Wirkung von Seitenmarkierungen noch nicht umfassend erforscht worden.

Wie in den Normen beschrieben, führen Seitenlinien dazu, dass die Autofahrenden eher in der Mitte der Strasse fahren. Zusätzlich können sie als Markierung besonderer Bereiche im Siedlungsgebiet verwendet werden (VSS, 2019a).

Durch die Verringerung der wahrgenommenen Fahrbahnbreite ist es auch möglich, eine Reduzierung der Geschwindigkeit zu erreichen, da die kognitive Belastung der Autofahrenden erhöht wird.

Eine Literaturauswertung ergab, dass Rand- und Fahrbahnmarkierungen bei Strassen ausserorts die Fahrzeuge an den Strassenrand bringen, aber nicht zu einer Verringerung der Geschwindigkeit führen (Davidse & van Driel, 2002). Taylor et al. (2002) stellten mit Hilfe eines Fahrsimulators bei Strassen ausserorts keine signifikante Geschwindigkeitsreduktion bei der Verwendung von breiten Bändern am Strassenrand fest. Erst in Kombination mit einer Mittelmarkierung (wie in Abb. 7, links) wurde eine signifikante Reduzierung der Geschwindigkeit erreicht.

Die Verwendung verschiedener Arten von Markierungen könnte zu einer Verringerung der Geschwindigkeit führen, wie zum Beispiel von Charlton (2007) untersucht wurde. Mit einer diagonalen Markierung in Kombination mit Schildern in Kurven bei Strassen ausserorts wurde eine reduzierte Fahrgeschwindigkeit erzielt.

Fahrstreifenbreite

Nationale und internationale Forschungsarbeiten zeigen übereinstimmend, dass schmalere Fahrstreifen sowohl innerorts als auch ausserorts zu einer geringeren Geschwindigkeit führen (Lindenmann & Leeman, 2008; Montella & Mauriello, 2011).

Die Fahrstreifenbreite kann die Fahrgeschwindigkeit durch verschiedene Mechanismen reduzieren (Elliott et al., 2003). Die Autofahrenden müssen sich auf einer engen Spur mehr Mühe geben, um sich auf der Spur zu halten, als auf einer breiten Spur. Ausserdem kann die wahrgenommene Geschwindigkeit der Autofahrenden höher sein, wenn Objekte in der vertikalen Peripherie näher heranrücken (z.B. parkende Autos, zu Fuss Gehende).

Fitzpatrick et al. (2001) zeigen mittels Messungen und statistischen Modellen auf, dass eine geringere Fahrstreifenbreite auf Strassen innerorts zu einer tieferen Geschwindigkeit führt. Dieser Effekt zeigte sich aber nur, wenn die signalisierte Geschwindigkeit in den Modellen nicht betrachtet wird.

Godley et al. (2004) fanden mittels einer Simulatorstudie heraus, dass eine Fahrstreifenbreite bis zu 3 Meter auf Strassen ausserorts nicht zu einer tieferen Geschwindigkeit führt. Sie vermuten, dass die wahrgenommene Fahrstreifenbreite noch kleiner sein muss, um die gefahrene Geschwindigkeit zu beeinflussen.

Kreisel

Kreisel führen dazu, dass Kreuzungen mit geringerer Geschwindigkeit befahren werden, wobei die Geschwindigkeit direkt proportional zur Wurzel des Radius des Kreisels ist (Ewert et al., 2010).

Vertikaler Versatz: punktuelle Erhöhung der Fahrbahn

Ein vertikaler Versatz kann die Geschwindigkeit reduzieren, da er den Fahrkomfort verringert. Es gibt verschiedene Arten von vertikalen Versätzen. Die Ausführungen variieren je nach der angestrebten Geschwindigkeitsreduktion. Es gibt auch Ausführungen, die für ÖV-Strecken geeignet sind, sodass der Versatz nicht zu Komfort- oder Geschwindigkeitseinbussen für den Busbetrieb führt.

Innerorts können vertikale Versätze, Warnschwellen sowie leicht überhöhte Querbänder geschwindigkeitsmindernd wirken (Eberling, 2013).

Schwarz et al. (2010) analysierten die Geschwindigkeit auf mehreren Strassen innerorts in der Schweiz. Ein vertikaler Versatz führt zu einer Reduzierung der Geschwindigkeit um 2 km/h bis 11.4 km/h. Martens et al. (1997) listen Studien auf, die die Effekte von vertikalen Versätzen auf Strassen innerorts evaluieren. Abhängig von Höhe und Länge des vertikalen Versatzes sind unterschiedliche Geschwindigkeitsabnahmen zu beobachten (siehe Johnson & Nedzesky, 2004; Layfield & Parry, 1998).

Aufgrund der erhöhten Lärmemissionen werden sie aber im Siedlungsgebiet nur bedingt empfohlen und daher von immer mehr Städten und Gemeinden mit Ausnahmen von Trottoirüberfahrten nur noch ausnahmsweise eingesetzt.

Horizontaler Versatz und seitliche Einengungen

Die Unterscheidung zwischen horizontalen Versätzen und seitlichen Einengungen ist in der Literatur nicht klar definiert. Während die seitliche Einengung eher eine punktuelle Wirkung hat und als Tor dient, bieten die horizontalen Versätze ein kontinuierliches Gestaltungselement. Beide Elemente können die Fahrbahnbreite verringern und damit die Geschwindigkeit reduzieren. Die Verschwenkung der Fahrbahn, beispielsweise durch eine Mittelinsel, wird häufig an Ortseinfahrten eingesetzt, um visuell auf die Änderung des Geschwindigkeitsregimes hinzuweisen.

Schwarz et al. (2010) zeigen, dass seitliche Einengungen dazu führen, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit gut eingehalten wird.

In einer Simulatorstudie konnte mit einem aufgebauten horizontalen Versatz sowie mit einem markierten horizontalen Versatz die Geschwindigkeit am Anfang einer Stadt beim Übergang zwischen ausserorts und innerorts eine Reduktion der Geschwindigkeit um 7 km/h nachgewiesen werden (Molino, 2009). In der gleichen Studie konnte aber für eine markierte und eine bauliche seitliche Einengung keine Abnahme der Geschwindigkeit nachgewiesen werden.

Aufgrund der in der Schweiz erhobenen Messdaten konnte für seitliche Einengungen sowie horizontale Versätze keine Abnahme der Geschwindigkeit auf Strassen innerorts nachgewiesen werden (Schwarz et al., 2010). Ariën et al. (2016) testeten die Wirkung einer Verschwenkung und wiesen eine Geschwindigkeitsreduktion von 3 km/h in unmittelbarer Nähe des Tores nach. Sie erklären diesen niedrigen Wert mit der im Vergleich zu anderen Studien geringeren Annäherungsgeschwindigkeit (70 km/h).

Abb. 8 *Links Molino (2009) und rechts Galante (2010)*

Mittelinsel und Querungen

Die Wirkung einer Mittelinsel und von Querungen ist in verschiedenen Studien erforscht worden. Eine Mittelinsel bei einer Dorfeinfahrt senkt die Geschwindigkeit in Kombination mit einer Schikane um bis zu 16 km/h (Galante et al., 2010). Wenn bei der gleichen Dorfeinfahrt keine Mittelinsel vorhanden ist, reduziert sich die Geschwindigkeit nur um 11 km/h und die Geschwindigkeitsabnahme ist somit geringer (Abb. 8).

Dixon et al. (2008) testeten verschiedene Gestaltungselemente bei Übergängen von ausserorts zu innerorts mit einem Fahrsimulator. Dabei sorgten ein «Median» mit Querungen, ein «Median» ohne Überquerungen und eine Mittelinsel als Tor mit Verschwenkung für eine Abnahme der Geschwindigkeit.

In den verschiedenen Skizzen und Simulatorbildern (siehe Abb. 8 und Abb. 9) wird deutlich, dass Mittelinseln, «Mediane» und horizontale Versätze oft mit Änderungen der horizontalen Ausrichtung der Strasse kombiniert werden. Die Entflechtung dieser beiden Elemente kann helfen, deren Effekte bezüglich der Geschwindigkeitsreduktion besser zu verstehen.

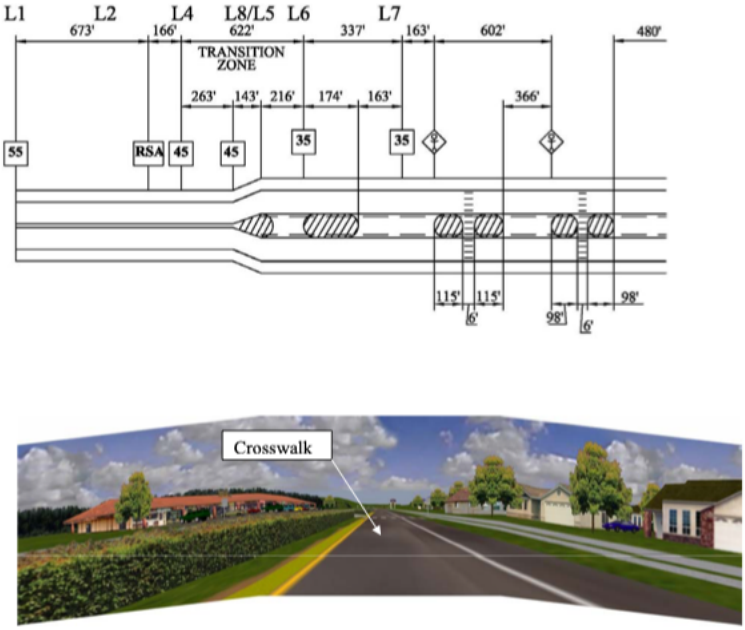


***Abb. 9** «Median» (Grünstreifen) mit Überquerungen (Dixon et al. 2008)*

Eine besondere Kategorie von punktuellen Massnahmen ist die Torwirkung bei Ortseinfahrten («Village Gateways»), die umfassend erforscht wurde. Möglichkeiten zur Gestaltung von Toren und deren Wirkung beim Übergang von Tempo 50 nach Tempo 30 innerhalb des Siedlungsgebiets sind weniger erforscht.

Die Wirkung von Fussgängerquerungen im Hinblick auf die Geschwindigkeit wurde in bisherigen Studien nicht untersucht.

Belag (Strassenoberfläche)

Eine Strasse mit einer raueren Oberfläche führt nicht direkt zu einer Verringerung der Geschwindigkeit. Vielmehr ist es die Verringerung des Fahrkomforts, die zu einer Verringerung der Fahrgeschwindigkeit, aber auch zu einer Erhöhung der Lärmemissionen führt, die beim Fahren über eine raue Oberfläche entstehen.

Dietiker et al. (2009) zitieren eine Studie, nach der eine neue, glatte Fahrbahn auf Landstrassen zu einer Geschwindigkeitssteigerung von 10 km/h führt. Martens et al. (1997) listen eine weitere Anzahl von Studien auf, die den Zusammenhang zwischen Fahrgeschwindigkeit und Strassenoberfläche untersucht haben. Im Allgemeinen wird festgestellt, dass die Fahrgeschwindigkeiten auf glatten Strassenoberflächen höher sind als auf gepflasterten Belägen. Es wird auch berichtet, dass niedrigere Fahrgeschwindigkeiten beobachtet wurden, wenn auf eine glatte Fahrbahnoberfläche eine raue Fahrbahnoberfläche folgt. Wie lange dieser Effekt anhält, ist nicht bekannt.

Randabschlüsse

Weiter kann durch die Verwendung verschiedener Beläge an den Fahrbahnrändern eine Verzahnung der Seitenräume sowie durch Längsteilung des Strassenraums in Raumkammern eine Senkung der Geschwindigkeit erzielt werden (Ewert et al., 2010). Dasselbe gilt bezüglich der Verwendung von «weichen» Randabschlüssen, z.B. einer Rinne.

2.4.4 Fahrbereich: Rad-/Parkstreifen

Radstreifen und Velostrassen

Radstreifen können die Geschwindigkeit reduzieren, weil sie entweder zu einer tatsächlichen Verengung der Fahrbahnbreite führen, die wahrgenommene Breite einer Fahrbahn verringern oder der Raum zwischen Fahrzeugen und Velofahrenden geteilt wird.

Geschwindigkeitsmessungen in den Niederlanden haben gezeigt, dass die Verbreiterung der Radwege, die jeweils eine andere Oberflächenfarbe ausweisen, zu einer Verringerung der Geschwindigkeit innerorts führen kann. Abb. 10 zeigt mehrere Impressionen von Designänderungen in zwei Gemeinden in den Niederlanden.

Die Verbreiterung der Radstreifen, sodass sie sich mit den Fahrstreifen überschneiden (Abb. 10, links), führte in Kombination mit einem horizontalen Versatz zu einer Reduzierung der Geschwindigkeit (v_{85}) von 44,9 km/h auf 41,9 km/h (Gemeente Oostzaan, 2019). Bei derselben Strasse mit nur einer breiteren Radspur wurden keine Effekte bezüglich der Fahrgeschwindigkeit erzielt (Abb. 10, Mitte). Die Einführung des Einbahnverkehrs, die Verbreiterung der Radstreifen und die Anbringung eines Schildes (Abb. 10, rechts) führten zu einer Reduzierung der Geschwindigkeit (v_{85}) von 46 km/h auf 40 km/h (Gemeente Hof van Twente, 2016).

In einer Simulatorstudie wurde hingegen gezeigt, dass die Radwege (die Farbe wird nicht erwähnt) nur dann zu einer Geschwindigkeitsreduktion führten, wenn eine radfahrende Person anwesend war; ohne Velofahrende wurde keine Geschwindigkeitsreduktion wahrgenommen (Chinn & Elliott, 2002).

Abb. 10 *Links und Mitte: Gemeinde Oostzaan; rechts: Gemeinde Hof van Twente*

Geschwindigkeitsmessungen in der Stadt Amsterdam zeigten, dass die Einführung der Radstrasse (in der Schweiz als Velostrassen bezeichnet, aber in den Niederlanden mit flächiger Oberfläche in roter Farbe; auf den Radstrassen ist MIV gestattet) auf einer Hauptverkehrsstrasse mit Strassenbahn auf eigener Trasse zu einer Reduzierung der Geschwindigkeit von 36 km/h auf 28 km/h führte (Gemeente Amsterdam, 2016). Ausserdem fühlten sich die Radfahrenden nach dem Umbau der Strasse wohler und sicherer.

Parkplätze

Untersuchungen haben gezeigt, dass das Vorhandensein von parkierten Autos zu einer geringeren Fahrgeschwindigkeit führt. Parkierte Fahrzeuge können zu einer (gefühlten) Verengung der Fahrbahnbreite und damit zu einer geringeren Geschwindigkeit führen. Das Parken kann auch zu einem höheren wahrgenommenen Risiko führen, dass Personen unvermittelt aus parkierten Autos aussteigen oder wegfahrende Autos auf die Fahrstreifen einschwenken können (Elliott et al., 2003).

Gemäss einer Regressionsanalyse haben parkierte Autos einen Einfluss auf die gefahrene Geschwindigkeit (Reduktion der Geschwindigkeit) entlang von Hauptverkehrstrassen innerorts (Gargoum et al., 2016) und auf die gewählte Geschwindigkeit auf Strassen innerorts (Chinn & Elliott, 2002; Molino, 2009). Elliott et al. (2003) listen eine Anzahl von Studien auf, die zeigen, dass parkierte Autos zu einer Geschwindigkeitsreduktion von 8 km/h bis 11 km/h führen.

2.4.5 Fussgängerraum

Bäume, Grünraum

Gemäss der Literaturübersicht von Elliot et al. (2003) haben Bäume oder Grünraum nur einen kleinen Einfluss auf die gefahrene Geschwindigkeit, vor allem bei Hauptverkehrstrassen ausserorts; innerorts wird in diesen Studien kein Einfluss festgestellt. Sobald Alter und Risikobereitschaft in die Analyse miteinbezogen werden, fanden Goldenbeld und van Schagen (2007) keinen Einfluss von Bäumen und Grünraum auf die Wahl der Geschwindigkeit.

Bei Hauptverkehrsstrassen innerorts in England konnte in der Studie von Chinn und Elliot (2002) kein Einfluss nachgewiesen werden.

Trottoirbreite

Die Breite des Trottoirs kann die Fahrgeschwindigkeit verändern. Ein breiteres Trottoir kann höhere Geschwindigkeiten verursachen, da zu Fuss Gehende weiter weg gehen können und die Fussgängerdichte geringer ist. Ebenfalls erhöht sich so der Abstand zu den Gebäuden, was die Menge an Objekten in der vertikalen Peripherie reduziert.

Aufenthaltsmöglichkeiten

Das Hinzufügen von Elementen auf dem Trottoir, wie z.B. Sitze, Bänke und Parkplätze für die Velofahrenden, kann den Kontrast in der vertikalen Sicht wieder erhöhen und so zu einer geringeren Geschwindigkeit führen. Diese Elemente können auch das Bild der Strasse verändern und zu einer geringeren, angemessenen Geschwindigkeit führen.

2.4.6 Stadtraum und Seitenraum

Grundstück: Fassadenflucht

Eine nach hinten versetzte Fassadenflucht hat visuell den gleichen Effekt wie ein breiteres Trottoir: Sie vergrössert den Abstand von Objekten in der visuellen Peripherie und kann so die Geschwindigkeit erhöhen. Ausserdem verringert sie die kognitive Belastung beim Fahren.

Wenn die Fassadenflucht hingegen näher an die Fahrbahn rückt, können Gebäude zu einer Abnahme der Geschwindigkeit führen, da sie (1) dafür sorgen, dass die kognitive Belastung zunimmt und (2) eine Einschränkung des Blickwinkels verursachen.

Nutzung

Gargoum et al. (2016) zeigen mittels Messungen auf, dass die Geschwindigkeit auf Strassen durch Siedlungsgebiet, das von Wohnnutzung oder publikumsorientierter Erdgeschossnutzung geprägt ist, abnimmt. Taylor et al. (2002) weisen denselben Effekt mit einer Simulatorstudie nach. Gebiete, die von Industrie geprägt sind, führen zu keiner tieferen Geschwindigkeit.

2.4.7 Signalisation

Geschwindigkeitsangabe

Die Forschung hat sich auf das Vorhandensein von Geschwindigkeitsschildern und anderen Arten von Schildern konzentriert. Die Effekte von auf dem Boden markierten Geschwindigkeitsangaben wurden nicht direkt erforscht.

Fitzpatrick et al. (2001) fanden mit Hilfe von auf Vorstadtstrassen in den USA gemessenen Geschwindigkeiten heraus, dass das ausgewiesene Tempolimit der wichtigste Prädiktor für die Fahrgeschwindigkeit ist.

Auf Basis einer Umfrage zeigen Lindenmann und Koy (2000), dass Signalisationen ohne weitere bauliche Massnahmen in kürzlich umgebauten Tempo-30-Zonen in der Schweiz zu einer Abnahme der Geschwindigkeit (v_{85}) von 46.7 km/h auf 45.4 km/h führen. Dagegen sinkt die Geschwindigkeit in Tempo-30-Zonen mit baulichen Massnahmen sogar von 46.2 km/h auf 37.9 km/h. Diese Erkenntnisse muss man im Kontext interpretieren, dass Tempo 30 damals einen neuartigen Charakter hatte. Neuere Untersuchungen in der Schweiz zeigen aber auch, dass die Signalisation einer Tempo-30-Zone ohne bauliche Massnahmen dazu führt, dass gegenüber der Referenzsituation mit Tempo 50 deutlich tiefere Geschwindigkeiten gefahren werden (Grolimund und Partner, 2017). Gleichzeitig zeigt sich aber, dass die Höchstgeschwindigkeit in der Regel von der Mehrheit der Autolenkenden nur dann eingehalten wird, wenn auch gestalterische Massnahmen wie horizontale Versätze, Torwirkung und vertikale Versätze vorhanden sind.

Distanztafeln

Taylor et al. (2002) haben die Wirkung von Schildern überprüft, welche die Distanz bis zum Beginn der nächsten verpflichtenden Geschwindigkeitsabnahme angeben. Die Kombination dieser Schilder mit anderen Gestaltungsmassnahmen führte zu einer signifikanten Abnahme der Geschwindigkeit.

Thematische Schilder

Goldenbeld et al. (2017) untersuchten die Auswirkungen von thematischen Schildern, die Autofahrende zur Einhaltung der Höchstgeschwindigkeit auffordern, ohne das Tempolimit zu erwähnen; die Schilder zeigten ein gezeichnetes Bild eines Kindes auf einem Velo. Auf diesen Strassen gab es ein Tempolimit von 30 km/h. Dazu haben sie vier Wochen lang die Geschwindigkeit auf verschiedenen Strassen in derselben Gemeinde gemessen. Sie fanden nur eine geringe Geschwindigkeitsreduktion in der ersten Woche der Messungen.

Van Houten et al. (1980) untersuchten die Verwendung eines Schildes, das den Prozentsatz der Personen anzeigte, die sich an die Geschwindigkeitsbegrenzung hielten. Die Geschwindigkeitsabnahme wurde auf einer Strasse gemessen, auf der die Geschwindigkeitsbegrenzung von 70 km/h auf 50 km/h reduziert wurde. Die Analysen zeigten, dass die Autofahrenden die Geschwindigkeit reduzierten, aber immer noch schneller fuhren als die signalisierte Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h.

Digitale Geschwindigkeitsinformationen

Zusätzlich zu den regulären Schildern und Themenschildern bieten digitale Informationsanzeigen die Möglichkeit, den Verkehrsteilnehmenden ein Feedback zu ihrer tatsächlichen Fahrgeschwindigkeit zu geben. Die Wirkung von digitalen Informationsanzeigen wurde mit Hilfe von Simulatoren und realen Messungen untersucht. Die Geschwindigkeitsreduktion durch digitale Informationsanzeigen wird realisiert, indem (1) den Fahrenden zusätzliches Feedback über ihre Fahrgeschwindigkeit gegeben wird, (2) sozialer Druck ausgeübt wird, um das Verhalten des Fahrenden anzupassen, während die Geschwindigkeit öffentlich angezeigt wird, (3) das Verhalten des Autofahrenden beeinflusst wird, indem gezeigt wird, dass die Mehrheit der Verkehrsteilnehmenden die Geschwindigkeitsbegrenzung einhält und (4) eine mögliche Kontrolle der Geschwindigkeitsüberschreitung angezeigt wird.

Mehrere andere Studien berichten über die Wirksamkeit von digitalen Geschwindigkeitsanzeigen. Ullman und Rose (2005) fanden heraus, dass Geschwindigkeitsanzeigen in

Schulzonen zu einer Reduzierung der Geschwindigkeit um 14 km/h führen, wenn die Anzeige eingeschaltet ist. In anderen Bereichen war die Geschwindigkeitsreduktion nicht gleich gross, aber immer noch signifikant. Dagegen beobachteten Wrapson et al. (2006) eine geringere Wirkung in Neuseeland, als sie drei Arten von Informationsanzeigen untersuchten. Des Weiteren testeten Walter und Broughton (2011) die Wirkung von digitalen Geschwindigkeitsanzeigen in London und stellten fest, dass die Anzeigen 200 Meter vor der Anzeige und an der Anzeige zu einer Geschwindigkeitsreduktion von 2.4 km/h führten. In 400 Metern Entfernung zeigten die Anzeigen keine Wirkung oder sogar eine Erhöhung der Geschwindigkeit. Weiterhin fanden Ariën et al. (2013) ähnliche Geschwindigkeitsreduktionen in einem ähnlichen Experiment, bei dem verschiedene Nachrichtenanzeigen getestet wurden, und stellten fest, dass die Anzeigen nur eine lokale Auswirkung auf die Fahrgeschwindigkeit hatten. Mehrere Studien weisen darauf hin, dass die Anzeige an Ort und Stelle bleiben sollte, damit der Effekt dauerhaft ist (Van Houten et al., 1980; Walter & Broughton, 2011).

2.4.8 Zwischenfazit

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Elemente der Strassengestaltung und deren Einfluss auf die Fahrgeschwindigkeit.

Eine wichtige Unterscheidung für das Verständnis der Wirkung von Gestaltungselementen ist die Differenzierung zwischen punktuellen und kontinuierlichen Massnahmen. Bei erfolgreicher Anwendung erreichen punktuelle Massnahmen eine lokale Reduzierung der Geschwindigkeit. Punktuelle Massnahmen können somit an Orten eingesetzt werden, an denen eine Geschwindigkeitsreduktion aus Sicherheits- oder anderen Gründen wünschenswert ist oder um sicherzustellen, dass die Autofahrenden in der Lage sind, auf die Umgebung zu achten. Beispiele hierfür sind Bereiche um Schulen oder Fussgängerübergänge. Es gibt nur eine begrenzte Anzahl von Messungen entlang von Hauptstrassen mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 30 km/h (Häfliger et al., 2019). Aus diesem Grund ist es nicht möglich, bezüglich der Wirkung von einzelnen punktuellen Gestaltungselementen ein Fazit zu ziehen. Punktuelle Massnahmen sind jedoch für den Einsatz entlang von Strassen mit einem höheren Verkehrsaufkommen und/oder öffentlichem Verkehr aus unterschiedlichen Gründen nicht geeignet (Häfliger et al., 2019). Besonders hervorzuheben ist die lokal begrenzte Wirkung auf die Geschwindigkeit sowie der negative Einfluss auf die Stetigkeit und den Verkehrsfluss. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Forschungsarbeit die Wirkung punktueller Massnahmen nicht weiter untersucht. Der Fokus wird folglich auf kontinuierliche Massnahmen gerichtet.

Der Effekt einer Verengung der Strasse mit breiten Bändern ist für Strassen ausserorts erforscht worden. Innerorts ist die Wirkung von breiten Bändern mit Ausnahme der Wirkung von Radstreifen nicht umfassend erforscht worden. Die Reduzierung der Geschwindigkeit durch diese Massnahmen wird in der Forschung nicht explizit erwähnt.

Bisher hat sich die Literatur nicht explizit mit der Anwendung verschiedener Typen von breiten Mittelstreifen auf städtischen Strassen befasst. Es besteht folglich eine Wissenslücke in Bezug auf die Wirkung von Kombinationen von breiten Mittsreifen mit und ohne Farben, Mustern, Fahrstreifenbreiten, Materialien und dem Vorhandensein von Hindernissen.

Mehrzweckstreifen führen in der bisherigen Forschung zu gemischten Ergebnissen. Es besteht folglich eine Lücke in der Forschung zur tatsächlichen Wirkung.

Eine weitere Wissenslücke ergibt sich im Hinblick auf die Wirkung von Mehrzweckstreifen in Kombination mit breiten Bändern. Eine Wirkung dieser Massnahmen auf die gefahrene Geschwindigkeit wird für die vorliegende Forschungsarbeit postuliert, da die Anwendung von Mehrzweckstreifen und breiten Bändern zu einer Verringerung der effektiven und der wahrgenommenen Fahrbahnbreite führen kann. Gegenthese ist, dass bei fehlendem Gegenverkehr das wahrgenommene Risiko verringert wird und diese Massnahme somit zu höheren Fahrgeschwindigkeiten führt.

Darüber hinaus öffnen sich relevante Forschungslücken in Bezug auf die Wirkung von Parkfeldern und Radstreifen.

Einige Studien haben gezeigt, dass die grösste Geschwindigkeitsabnahme durch eine Kombination von mehreren Elementen der Strassenraumgestaltung erreicht werden kann. Nichtdestotrotz wäre es zuerst wichtig, die Wirkung von einzelnen Elementen zu überprüfen, bevor Kombinationen überprüft werden.

2.5 Fazit und Input für nachfolgende Arbeitsschritte

Erkenntnisse aus der Grundlagenanalyse (Kapitel 2) bilden die Basis für das weitere Vorgehen in drei Bereichen:

(1) Psychologische Ansätze dienen der Erklärung der Wirkung von Gestaltungselementen im Strassenraum auf die Geschwindigkeitswahl. Im vorliegenden Projekt wird mit einer Befragung im Rahmen der VR-Fahrsimulatorstudie die Risikowahrnehmung und die wahrgenommene Komplexität der Strasseninfrastruktur erhoben, um offene Fragen zu den Wirkungsmechanismen der Gestaltungselemente zu beantworten.

(2) Die Grundlagenanalyse zeigt, dass zur Messung der Wirksamkeit von Gestaltungselementen in Bezug auf die Geschwindigkeitswahl verschiedene Methoden mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen zum Einsatz kommen. Zur Gewährleistung der Validität werden im vorliegenden Forschungsprojekt die Methoden der Messung im Feld, der VR-Fahrsimulatorstudie und der Befragung kombiniert.

(3) Die Literaturrecherche zur bisherigen Forschung zur Wirksamkeit zeigt, welche Gestaltungselemente sich als wirksam erwiesen haben und bei welchen ein weiterer Forschungsbedarf besteht (vgl. Tab. 3). Diese werden für die nachfolgenden Arbeitsschritte weiteren Analysen unterzogen. Des Weiteren werden kontinuierliche Massnahmen miteinbezogen, welche zumindest teilweise eine Wirkung auf die gefahrene Geschwindigkeit zeigen und für welche es Forschungslücken gibt.

***Tab. 3** Übersicht kontinuierlicher Gestaltungselemente: Zusammenfassung*

Raum	**Gestaltungselement**		**Wirkung (Wirkmechanismus)**
		P/K *	
Fahrbereich: Markierungen	Keine Trennung der Fahrstreifen	K	(+) Komplexität und Risiko erhöht
	Trennung der Fahrstreifen zur Kennzeichnung der Fahrrichtungen: «Median» und Mehrzweckstreifen	K	(+/-)
	Seitenmarkierung: Breite Bänder	K	(+/-) Wirkung nur in Kombination mit Mittelstreifen; Komplexität und Risiko erhöht
Fahrbereich: Fahrbahn	Fahrstreifenbreite	K	(+) Komplexität und Risiko erhöht
	Strassenbelag (glatte Strassenoberfläche)	K	(+) Höherer Komfort
	Randabschlüsse (weiche/Verzahnung)	K	(+) unklar
Fahrbereich: Parkieren und Radstreifen	Radstreifen und Velostrassen	K	(+) Komplexität und Risiko erhöht; wirken nur bei Einengung und anwesenden Velofahrenden
	Parkplätze	K	(+) Komplexität und Risiko erhöht
Fussgängerraum	Grünraum	K	(+/-) unklar
Signalisation	Geschwindigkeitsangabe	P	(+) Wissen

Anmerkung. P = punktuelle Massnahmen; K = kontinuierliche Massnahmen; Wirkung: (+) Reduktion der Geschwindigkeit/(-) Erhöhung der Geschwindigkeit; (+/-) unklare Ergebnisse

3 Messungen

3.1 Einführung und Aufbau des Kapitels

Die in diesem Kapitel vorgestellte Arbeit verfolgt das Ziel, den Einfluss von Gestaltungselementen auf die Geschwindigkeit auf Basis von bestehenden und neuen Messungen abzuschätzen. Das übergeordnete Vorgehen ist in Abb. 11 dargestellt.

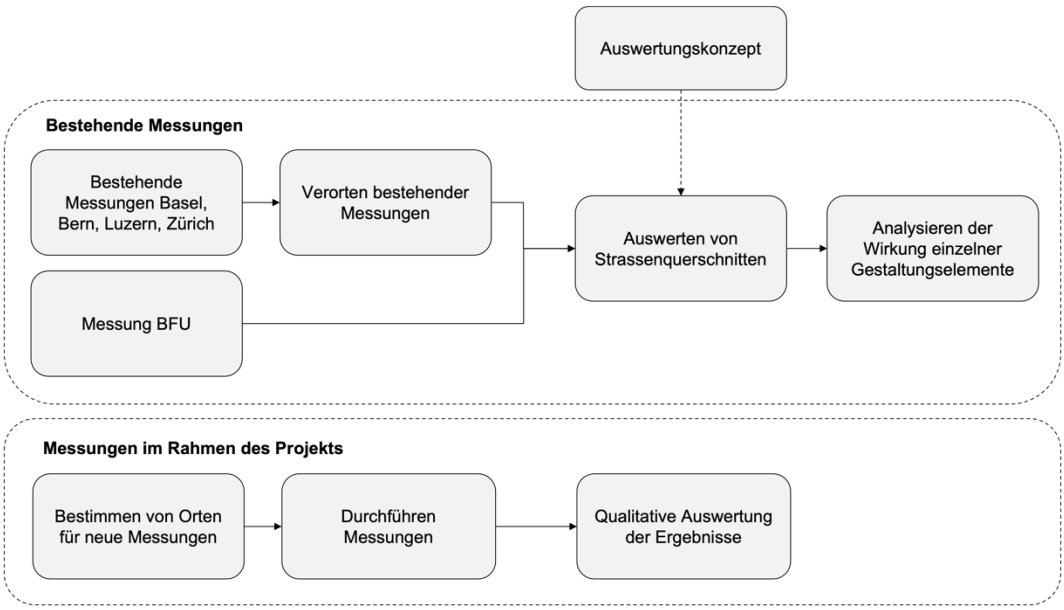


***Abb. 11** Übergeordnetes Vorgehen für die Auswertung von Geschwindigkeitsmessungen*

Zwei parallele Verfahren werden verfolgt. Das erste Verfahren bezieht sich auf bereits bestehende Geschwindigkeitsmessungen. Die Quellen werden in Abschnitt 3.2.1 näher beschrieben. Bei den Strassen, entlang welchen die Messungen durchgeführt worden sind, werden die vorhandenen Gestaltungselemente mittels eines Auswertungskonzepts erfasst. Das Auswertungskonzept wird in Abschnitt 3.2.2 präsentiert. Deskriptive Statistiken sowie statistische Modelle auf Basis der bestehenden Messungen werden in Abschnitt 3.2.3 und folgend vorgestellt.

Das zweite Verfahren bezieht sich auf neue Messungen. Entlang von fünf Strassen werden an jeweils zwei Querschnitten mit einer unterschiedlichen Gestaltung Messungen durchgeführt. Die Methode sowie die Wahl der Messstrecken werden in Abschnitt 3.3.1 näher erläutert. Die Ergebnisse werden in den Abschnitten 3.3.2 bis 3.3.6 präsentiert.

Das Ziel des Kapitels ist es, den Einfluss der Strassenraumgestaltung auf die gefahrene Geschwindigkeit zu verstehen und zu quantifizieren. Die Messungen geben eine Vorstellung über Wirkung und Reichweite von Elementen der Strassenraumgestaltung und werden dazu verwendet, die Resultate des Experiments mit dem VR-Fahrsimulator zu reflektieren, welche in Kapitel 4 vorgestellt werden.

3.2 Bestehende Messungen

3.2.1 Datenbasis

Die für diese Forschungsarbeit verwendeten Daten basieren auf zwei unterschiedlichen Quellen:

- Messblätter von Geschwindigkeitsmessungen, die im Zeitraum von 2006 bis 2019 erhoben wurden.

- Messungen der Beratungsstelle für Unfallverhütung (BFU) im Rahmen des Pilotprojekts «Geschwindigkeit auf Schweizer Strassen», welche die Auswertungen von Standorten mit automatischen Verkehrszählsystemen umfassen und mit manuellen Messungen und eigens installierten Messsystemen ergänzt wurden (Niemann, 2020).

Die Messungen auf Basis der Messblätter sind in Tab. 4 aufgelistet. Diese Messungen sind im Zeitraum von 2006 bis 2019 erhoben worden. Insgesamt konnten so 85 Messungen berücksichtigt, verortet und digitalisiert werden.

Tab. 4 *Ausgewertete Geschwindigkeitsmessungen aus Messblättern*

Kanton	**Tempolimit**			
	20 km/h	**30 km/h**	**50 km/h**	**Total**
Basel-Stadt	15	16		31
Bern			4	4
Luzern		12	1 (+12)	13
Zürich	2	17	11	31
Total	17	45	16	85 (+12)

Für Basel-Stadt sind Messungen für Strassen mit einem Tempolimit von 20 km/h und 30 km/h verfügbar. Diese Messungen wurden im Rahmen von Wirkungsanalysen nach der Einführung von Begegnungszonen und Tempo 30 durchgeführt. Ein Teil der für die Stadt Basel vorhandenen Messungen konnte nicht verwendet werden, da diese Messungen nur sehr wenig Beobachtungen umfassen. So wurden bei 11 Messungen weniger als 5 Fahrzeuge pro Richtung verzeichnet.

Für den Kanton Bern sind Messungen für Strassen mit einem Tempolimit von 50 km/h und 60 km/h verfügbar. Nur die Messungen entlang von Strassen mit einem Tempolimit von 50 km/h sind verwendet worden.

Für den Kanton Luzern sind Messungen für Strassen mit einem Tempolimit von 30 km/h und 50 km/h verfügbar. Viele der verwendeten Messungen wurden im Rahmen von Wirkungsanalysen bei der Umstellung von Tempo 50 auf Tempo 30 erhoben (12 Messungen). Dabei wurden jeweils nur die Messungen nach der Umstellung auf Tempo 30 verwendet.

Für den Kanton Zürich sind Messungen für Strassen mit einem Tempolimit von 20 km/h, 30 km/h und 50 km/h verfügbar.

In den Messblättern der verschiedenen Städte und/oder Kantone werden jeweils verschiedene Kennzahlen aufgelistet. So wird unterschieden zwischen $v_{mittelwert,}$ v_{50} und v_{85} sowie nach Tageszeit (Tag, Nacht, 24 Stunden) und Tag der Woche (Wochentag/Wochenende). Für die weitere Analyse wurde entschieden, den Wert v_{85} zu benutzen, welcher tagsüber an den Wochentagen gemessen wurde. Wenn die Messungen richtungsgetrennt verfügbar waren, wurde der Maximalwert genommen.

Die von der BFU evaluierten und ausgeführten Messungen sind in Tab. 5 aufgelistet. Bei der Auswahl der Messstandorte wurden bestimmte Kriterien benutzt. Die Messorte sollten möglichst entlang von geraden und ebenen Strecken liegen, mindestens 250 Meter von einer anderen stationären Geschwindigkeitskontrolle entfernt liegen und die Distanz zur nächsten Kreuzung sollte minimal 100 Meter betragen. Weitere Kriterien sind im Bericht «Geschwindigkeit auf Schweizer Strassen» erfasst (Niemann, 2020). Für die weitere Analyse wurde auch hier entschieden, den Wert für v_{85} zu benutzen, welcher tagsüber an den Wochentagen gemessen wurde.

Tab. 5 *Anzahl der ausgewerteten Geschwindigkeitsmessungen BFU*

Sprachgebiet	**Tempolimit**			
	30 km/h	**50 km/h**	**80 km/h**	**120 km/h**
Deutschschweiz	30	25	20	30
Romandie/Tessin	30	27	28	21
Total	60	52	48	51

3.2.2 Operationalisierung der vorhandenen Gestaltungselemente

Die Klassifizierung der für die einzelnen Strecken erhobenen Gestaltungselemente erfolgt aufgrund der in Kapitel 2 eingeführten Nomenklatur und unterscheidet zwischen Elementen im Fahrbereich sowie im Stadt- und Seitenraum (siehe Tab. 6 und Tab. 7).

Aufgrund der grossen Anzahl von Messtrecken bietet sich eine Erhebung der vorliegenden Gestaltungselemente vor Ort nicht an. Zwar sind auf einigen Messberichten Fotos vorhanden, oft zeigen diese aber nur die Befestigung des Messgeräts oder bieten keine genügend gute Auflösung und keinen genügend breiten Bildwinkel, um die im Strassenraum vorhandenen Gestaltungselemente klassifizieren zu können. Daher wurden folgende im Internet verfügbaren Bilddaten- und Kartenquellen für die Erhebung und Klassifizierung der Gestaltungselemente verwendet:

- Geoviewers der kantonalen Vermessungsämter:
  - Fahrstreifenbreiten
  - Entfernung zur Fassadenflucht
  - Umfeldnutzung
- Weitere Attribute:
  - Google Street View
  - Wenn Google Street View nicht vorhanden war, wurden jeweils die über https://map.geo.admin.ch/ verfügbaren Orthofotos benutzt.

Eine Schwierigkeit bei der Verwendung von Google Street View wie auch der Orthofotos ist, dass das Datum der Bildaufnahmen nicht mit dem Messdatum der Geschwindigkeitsmessungen übereinstimmt und sich die Gestaltung des Strassenraums in der dazwischen liegenden Zeit geändert haben könnte. Bei der Erfassung der Bilddaten wurde aber jeweils das Datum notiert, an dem das Bild von Google Street View respektive das Orthofoto erstellt wurde. Im Rahmen der Auswertung wurde überprüft, ob es nötig ist, bestimmte Messungen aufgrund dieser Problematik auszuschliessen.

Der Umfang der berücksichtigten Gestaltungselemente im Strassen-, Fussgänger- und Stadtraum sowie deren Operationalisierung ist in Tab. 6 und Tab. 7 dargelegt. Für die meisten Elemente erfolgt die Attribuierung als Ja/Nein-Variable.

Je nach Art des Gestaltungselements wurden bei der Operationalisierung im Längsschnitt unterschiedliche Bereiche berücksichtigt (Abb. 12):

- Die Fahrstreifenbreite und die Anzahl Spuren werden auf Höhe des Messpunkts aufgenommen.
- Die Gestaltungselemente «horizontaler Versatz» und «seitliche Einengung» werden nur berücksichtigt, wenn diese in unmittelbarer Nähe vom Messpunkt liegen.
- Kontinuierliche Gestaltungselemente wie Parkfelder und Markierungen zur Trennung der Fahrstreifen werden nur innerhalb einer Distanz von 50 Meter vom Messpunkt berücksichtigt.
- Ebenso werden punktuelle Gestaltungselemente (Signalisation und Markierungen) nur innerhalb einer Distanz von 50 Meter vom Messpunkt berücksichtigt. Innerhalb

dieser Distanz hat das punktuelle Element noch einen Einfluss auf die gefahrene Geschwindigkeit.

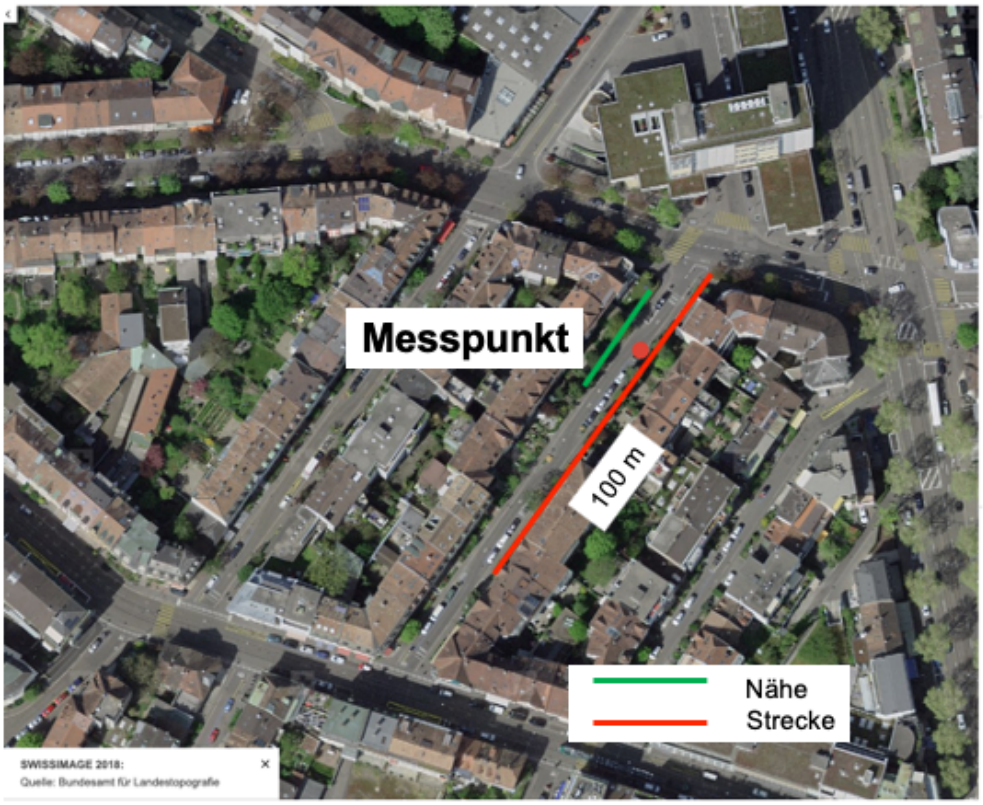


Abb. 12 *Betrachtungsgebiet bei der Auswertung von Messungen (Beispiel)*

***Tab. 6** Erhobene Gestaltungselemente im Fahrbereich*

Gestaltungselement	**Attribute**	**Fahrbahn/beide Seiten**
Trennung der Fahrstreifen	Nein/Leitlinie/Sicherheitslinie/Mehrzweckstreifen	Fahrbahn
Verengung durch Markierung (z.B. FGSO)	Ja/Nein	Fahrbahn
Flächige Gestaltung	Ja/Nein	Fahrbahn
Fussgängerüberquerung	Ja/Nein	Fahrbahn, in der Nähe des Messpunkts
Mittelinsel mit Fussgängerstreifen	Ja/Nein	Fahrbahn, in der Nähe des Messpunkts
Mittelinsel ohne Fussgängerstreifen	Ja/Nein	Fahrbahn, in der Nähe des Messpunkts
Vertikaler Versatz: punktuelle Erhöhung der Fahrbahn	Ja/Nein	Fahrbahn
Horizontaler Versatz: Unterbruch der Geradlinigkeit der Fahrbahn, entweder mit oder ohne Parkfelder	Ja, mit Parkieren einseitig/Ja, mit Parkieren beidseitig/Ja, mit Veloabstellplätzen/Ja, sonstiges/Nein	Fahrbahn, in unmittelbarer Nähe des Messpunkts
Seitliche Einengungen: örtliche Reduktion der Breite der Fahrstreifen	Ja/Nein	Fahrbahn, in unmittelbarer Nähe des Messpunkts
Fahrstreifenbreite	Breite in m	Beide Seiten, beim Messpunkt
Busspur	Ja/Nein	Beide Seiten
Tram (mit/ohne eigene Trasse)	Ja/Nein	Beide Seiten
Belag		Fahrbahn
Velostrasse		Fahrbahn
Gerade/Kreisbogen/Übergangsbogen	Gerade/Bogen	Beide Seiten
Geschwindigkeit [Schild]	Ja/Nein	Fahrbahn, in der Nähe des Messpunkts
Geschwindigkeitsmarkierung	Ja/Nein	Fahrbahn, in der Nähe des Messpunkts
Thematisches Schild	Ja/Nein	Fahrbahn, in der Nähe des Messpunkts

Distanztafeln (Countdown-Zeichen)	Ja/Nein	Fahrbahn, in der Nähe des Messpunkts
Radstreifen	Ja/Nein	Beide Seiten
Parkplätze	Ja/Nein	Beide Seiten

Tab. 7 *Erhobene Gestaltungselemente im Fussgänger- und Stadtraum*

Gestaltungselement	**Attribute**	**Fahrbahn/ beide Seiten**
Grünraum	Wenig/mittel/viel	Beide Seiten
Trottoir	nicht vorhanden/schmal (< 1m)/Normal (1 – 3m)/breit (> 3m)	Beide Seiten
Grundstück: Fassadenflucht	Breite ab Strassenmitte bis zur Fassadenflucht	Beide Seiten
Grundstück: Parkplätze	Ja/Nein	Beide Seiten
Grundstück: Begrünung	Ja/Nein	Beide Seiten
Grundstück: Nutzung	Gemäss Geoviewer	Beide Seiten

3.2.3 Deskriptive Statistiken

Nach der Digitalisierung und Verortung der bestehenden Messungen und der Auswertung der Strassen werden die zwei Datensätze zusammengefügt. Insgesamt stehen 34 Messungen mit einem Tempolimit von 20 km/h, 99 Messungen mit einem Tempolimit von 30 km/h und 66 Messungen mit einem Tempolimit von 50 km/h zur Verfügung.

Tab. 8 und Tab. 9 zeigen jeweils pro Gestaltungselement die Anzahl der Beobachtungen *n,* den relativen Anteil der Beobachtungen in Prozent und die gefahrene Geschwindigkeit *v*. Die angegebene Geschwindigkeit ist der Durchschnittswert der gemessenen v_{85}.

Es gibt in dem vorhandenen Datensatz zum Beispiel 18 Einbahnstrassen mit einem Tempolimit von 20 km/h und 12 Strassen mit Gegenverkehr mit einem Tempolimit von 20 km/h. Die mittlere gefahrene Geschwindigkeit entlang von Einbahnstrassen war 26.3 km/h; die gefahrene Geschwindigkeit entlang von Strassen mit Gegenverkehr war 28 km/h.

Bestimmte Gestaltungselemente, wie z.B. Parkplätze und Radstreifen, sind für beide Seiten der Strasse erhoben worden. Die erhobenen Daten sind in diesen Fällen zusammengefasst worden.

Aus anderen kontinuierlichen Variablen sind Gruppen gebildet worden. Die Fahrbahnbreite wurde auf Basis der Fahrstreifenbreite auf beiden Seiten der (imaginären) Trennung und der Anzahl der Spuren berechnet. Die Fahrbahnbreite beinhaltet keine allfälligen Parkplätze und Radstreifen. Nach der Berechnung der Fahrbahnbreite wurde die Breite in die folgenden Kategorien gruppiert: < 3 Meter, 3 Meter bis 4 Meter, 4 Meter bis 5 Meter, 5 Meter bis 6 Meter, 6 Meter bis 7 Meter und breiter als 7 Meter. Diese Kategorien sind auf Basis einer visuellen Auswertung der verfügbaren Breiten gebildet worden.

***Tab. 8** Deskriptive Statistiken Fahrbereich*

Gestaltungs-element	**Wert**	**Tempolimit**								
		20 km/h			**30 km/h**			**50 km/h**		
		n	**%**	**v**	**n**	**%**	**v**	**n**	**%**	**v**
Gegenverkehr	Einbahn-strasse	18	53	26.3	10	10	31.6	1	2	56
	Gegenver-kehr	16	47	28	89	90	34.6	65	98	53.1
Parkplätze [eine Seite oder beide Seiten]	Ja	34	100	27.1	71	72	33.6	9	14	47.1
	Nein	-	-	-	28	28	36.1	57	86	54.1
Radstreifen [eine Seite oder beide Seiten]	Ja	-	-	-	4	4	35.8	24	36	53.5
	Nein	34	100	27.1	95	96	34.3	42	64	53
Horizontaler Versatz [Par-kieren]	Ja, Parkie-ren	25	74	26.8	43	43	33.3	1	2	38
	Ja, Pfosten oder Mar-kierung	-	-	-	3	3	40	1	2	54
	Nicht vor-handen	9	26	27.8	53	54	34.8	64	97	53.4
Horizontaler Versatz [Seite]	Ja, kontinu-ierlich	9	26	26	21	21	34.9	2	3	46
	Ja, wech-selseitig	16	47	27.3	25	25	32.7	-	-	-
	Nicht vor-handen	9	26	27.8	53	54	34.8	64	97	53.4
Mittelinsel	Ja	-	-	-	5	5	37	10	15	49.3
	Nein	34	100	27.1	94	95	34.2	56	85	53.9
Fussgänger-überquerung	Ja	-	-	-	34	34	35.7	21	32	51.4
	Nein	34	100	27.1	65	66	33.6	45	68	54
Vertikaler Ver-satz	Ja	-	-	-	11	11	34.8	-	-	-
	Nein	34	100	27.1	88	89	34.2	66	100	53.2
Geschwindig-keitsschild	Ja	25	100	27.2	35	35	33	4	6	60.8
	Nein	-	-	-	64	65	35	62	94	52.7
Fahrbahn-breite	< 3 m	3	9	26	1	1	26	0	0	0
	3 m - 4 m	23	68	26.4	17	17	31.8	2	3	56

	4 m - 5 m	5	15	30	26	26	32.7	3	5	52
	5 m - 6 m	3	9	28.3	22	22	35.7	6	9	46.3
	6 m - 7 m	-	-	-	26	26	36.4	37	56	54.5
	7 m	-	-	-	7	7	35.3	18	27	52.7
Mittellinie	keine Trennung	1	3	29	32	32	36.5	11	17	52.3
	Leitlinie	-	-	-	6	6	35.2	38	58	53.7
	Nicht nötig (Fahrstreifenbreite < 5.5 m)	33	97	27	61	62	33.1	9	14	48.9
	Sicherheitslinie	-	-	-	-	-	-	8	12	57

Im Bereich Stadtraum sind einige Attribute nachträglich von den erhobenen Attributen abgeleitet worden:

- Das Vorhandensein von Grünraum ist gegeben, wenn es auf einer Seite oder auf beiden Seiten der Strasse Büsche oder einige Bäume hat.
- Für die Umfeldnutzung ist die Nutzung auf beiden Seiten der Strasse zu evaluieren. Die wichtigsten Nutzungen sind wie folgt definiert:
    - Wenn auf beiden Seiten der Strasse Wohnnutzungen vorhanden sind, wird die Strasse der Nutzung «Wohnen» zugeordnet.
    - Wenn eine Seite der Strasse als Wohnzone klassifiziert ist, und die andere Seite der Strasse als Grünraum oder Freizeitzone, wird die Strasse als Wohnzone eingestuft.
    - Wenn eine Seite der Strasse als Mischzone oder Arbeitszone klassifiziert ist, und die andere Seite der Strasse als Wohnzone, wird die Strasse der Nutzung «Mischzone» zugeordnet.
- Die Entfernung der Baulinie ist die Entfernung ab der Mittellinie (oder der imaginären Mittellinie). Diese Entfernung enthält die Fahrbahnbreite und allenfalls Parkplätze und/oder Radstreifen.
- Die Entfernung ab Strassenrand ist abgeleitet von den anderen erhobenen Attributen, wie z.B. der Anwesenheit von Parkfeldern sowie der Breite der Radstreifen (sofern vorhanden).

Tab. 9 *Deskriptive Statistiken Stadtraum*

Gestaltungselement	**Wert**	**Tempolimit**								
		20 km/h			**30 km/h**			**50 km/h**		
		n	**%**	**v**	**n**	**%**	**v**	**n**	**%**	**v**
Grünraum	Ja	2	6	27.5	13	13	36.4	11	17	52.5
	Nein	32	94	27.1	86	87	34	55	83	53.3
Trottoir [eine Seite oder beide Seiten]	Ja	33	97	27	96	97	34.3	64	97	53.4
	Nein	1	3	29	3	3	34.3	2	3	47
Entfernung Baulinie ab Strassenmitte	<= 10 m	2	6	27	4	4	40	10	15	51.7
	10 m – 20 m	30	88	27.1	69	70	33.6	24	36	52.8
	20 m – 30 m	2	6	26.5	21	21	34.7	19	29	54.6
	> 30 m	0	0	0	5	5	37.6	13	20	53
Entfernung Baulinie ab Strassenrand	<= 5 m	4	12	26.5	15	15	36.6	5	8	43.4
	5 m – 10 m	24	71	27	37	37	32.8	16	24	52.9
	10 m – 20 m	6	18	27.7	40	40	34.6	22	33	54.5
	> 20 m	0	0	0	6	6	35	17	26	54.4
	Keine Gebäude	0	0	0	1	1	40	6	9	54
Umfeldnutzung	Arbeiten	0	0	0	4	4	38.8	7	11	52.4
	Ausbildung	1	3	29	2	2	34	1	2	43
	Grün/Freizeit	0	0	0	1	1	34	4	6	53.8
	Mischzone	15	44	26.7	41	41	35.2	25	38	51.4
	Wohnen	18	53	27.3	51	52	33.2	29	44	55.1

Im nächsten Abschnitt wird die gefahrene Geschwindigkeit vorgestellt.

3.2.4 Allgemein: Gefahrene Geschwindigkeit

Der durchschnittlich gemessene Wert für v_{85} beträgt auf Strassen mit Tempo 20 rund 27.1 km/h, auf Strassen mit einem Tempolimit von 30 km/h rund 34.3 km/h und auf Strassen mit Tempo 50 rund 53.2 km/h (siehe Abb. 13).

Die Ausreisser auf den Strassen mit einem Tempolimit von 50 km/h sind alle in Zürich zu finden und beinhalten die Affolternstrasse, die Altstetterstrasse und die Kanonengasse.

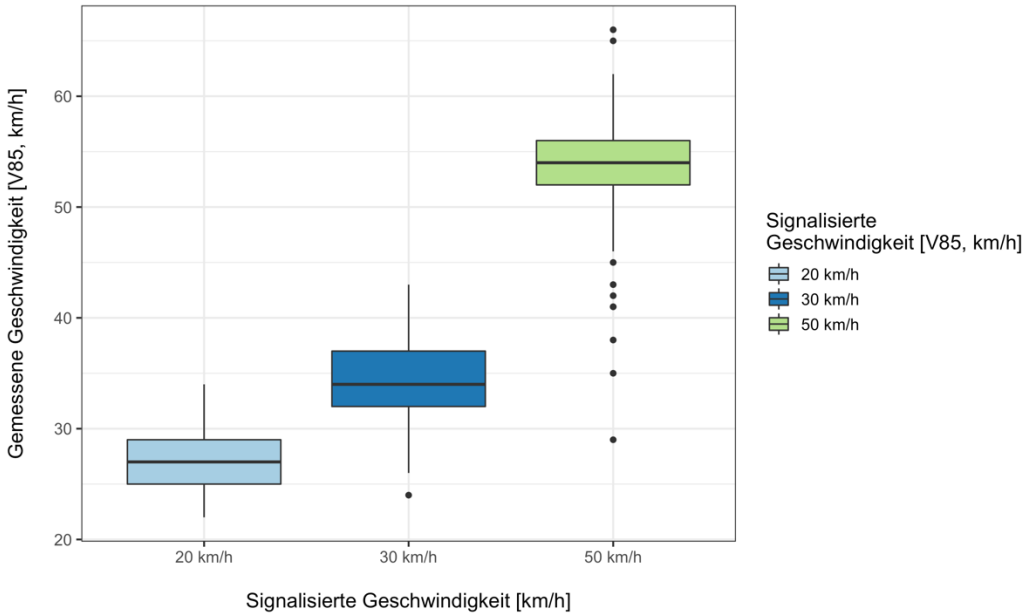


Abb. 13 *Gefahrene Geschwindigkeit*

In Abschnitt 3.2.5 und Abschnitt 3.2.6 wird der Einfluss der einzelnen Elemente statistisch ausgewertet und, wo als nötig erachtet, visuell dargestellt. Pro Gestaltungselement wird mittels einer Varianzanalyse überprüft, ob die Unterschiede in den gefahrenen Geschwindigkeiten signifikant sind. Wenn es mehrere Attributebenen gibt, wird ein Tukey-Test durchgeführt. Wenn die p-Werte der Tests kleiner als 0.05 sind, werden die Effekte als signifikant erachtet. Wenn die p-Werte kleiner als 0.2 sind, werden die Attribute aufgelistet, jedoch nicht als signifikant eingestuft. Durch die kleine Anzahl der Beobachtungen in bestimmten Fällen kann es sein, dass im Datensatz nicht für alle Tempolimits genügend Strassen mit bestimmten Gestaltungselementen vorhanden waren. In einem zweiten Schritt wurden Regressionsmodelle geschätzt, um den weiteren Zusammenhang zwischen Strassenraumgestaltung und gefahrener Geschwindigkeit abzuschätzen.

3.2.5 Fokus: Fahrbereich

Gegenverkehr

Bei einem Tempolimit von 20 km/h wird auf Strassen mit Gegenverkehr schneller gefahren als auf Einbahnstrassen ($v_{Gegenverkehr}$ = 28 km/h; $v_{Einbahnstrasse}$ = 26.3 km/h). Diese Unterschiede sind nicht signifikant (p = 0.13). Auf Strassen mit einem Tempolimit von 30 km/h wird bei Gegenverkehr ebenfalls schneller gefahren ($v_{Gegenverkehr}$ = 34.6 km/h; $v_{Einbahnstrasse}$ = 31.6 km/h). Diese Unterschiede sind signifikant (p < 0.05). Auf Strassen mit einem Tempolimit von 50 km/h wird bei Gegenverkehr jedoch langsamer gefahren ($v_{Gegenverkehr}$ = 53.1 km/h; $v_{Einbahnstrasse}$ = 56 km/h).

Parkplätze

Bei einem Tempolimit von 20 km/h gibt es auf allen Strassen Parkplätze; eine weitere Auswertung hinsichtlich der Anwesenheit von Parkplätzen auf einer Seite oder beiden Seiten

der Strasse ist nicht nötig. Bei einem Tempolimit von 30 km/h wird auf Strassen ohne Parkplätze schneller gefahren ($v_{ohne\ Parkplätze}$ = 36.1 km/h; $v_{mit\ Parkplätze}$ = 33.1 km/h). Diese Unterschiede sind signifikant ($p < 0.01$). Auch auf Strassen mit einem Tempolimit von 50 km/h wird ohne Parkplätze schneller gefahren ($v_{ohne\ Parkplätze}$ = 54.1 km/h; $v_{mit\ Parkplätze}$ = 47.1 km/h). Diese Unterschiede sind ebenfalls signifikant ($p < 0.01$).

Radstreifen

Bei einem Tempolimit von 20 km/h gibt es auf keiner Strasse einen Radstreifen. Bei einem Tempolimit von 30 km/h wird auf Strassen ohne einen Radstreifen schneller gefahren ($v_{ohne\ Radstreifen}$ = 35.8 km/h; $v_{mit\ Radstreifen}$ = 34.3 km/h). Diese Unterschiede sind nicht signifikant. Auch auf Strassen mit einem Tempolimit von 50 km/h wird ohne Radstreifen schneller gefahren ($v_{ohne\ Radstreifen}$ = 53.5 km/h; $v_{mit\ Radstreifen}$ = 53 km/h). Diese Unterschiede sind ebenfalls nicht signifikant.

Horizontaler Versatz: Versetztes Parkieren und Pfosten

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, um einen horizontalen Versatz zu gestalten. Einerseits kann ein Versatz mittels Parkfeldern oder Pfosten gestaltet werden. Anderseits kann ein Versatz mittels Parkfeldern auf nur einer Seite der Strasse gestaltet werden, oder aber wechselseitig, sodass die Fahrtrichtung mehrmals angepasst werden muss.

Bei einem Tempolimit von 20 km/h wird auf Strassen ohne Versatz schneller gefahren ($v_{Versatz\ Parkieren}$ = 26.8 km/h; $v_{kein\ Versatz}$ = 27.8 km/h). Diese Unterschiede sind nicht signifikant. Auf Strassen mit einem Tempolimit von 30 km/h wird bei einem horizontalen Versatz mit Parkplätzen langsamer gefahren ($v_{Versatz\ Parkieren}$ = 33.3 km/h; $v_{kein\ Versatz}$ = 34.8 km/h). Diese Unterschiede sind signifikant ($p < 0.01$).

Bei einem Tempolimit von 20 km/h wird auf Strassen ohne Versatz schneller gefahren als auf Strassen mit einem Versatz, welcher kontinuierlich oder wechselseitig ausgestaltet ist ($v_{Versatz\ kontinuierlich}$ = 26.8 km/h; $v_{Versatz\ Wechselseitig}$ = 27.3 km/h; $v_{kein\ Versatz}$ = 27.8 km/h). Diese Unterschiede sind nicht signifikant. Auf Strassen mit einem Tempolimit von 30 km/h wird mit einem wechselseitig gestalteten horizontalen Versatz langsamer gefahren ($v_{Versatz\ wechselseitig}$ = 32.7 km/h; $v_{Versatz\ kontinuierlich}$ = 34.9 km/h; $v_{kein\ Versatz}$ = 34.8 km/h). Die Unterschiede zwischen einem wechselseitig gestalteten Versatz und Strassen ohne Versatz sind nicht signifikant ($p < 0.1$), genauso wie die Unterschiede zwischen einem wechselseitig gestalteten Versatz und Strassen mit einem einseitigen Versatz ($p < 0.15$).

Für Strassen mit einem Tempolimit von 50 km/h gibt es zu wenig Beobachtungen mit einem horizontalen Versatz, um aussagekräftige Schlüsse ziehen zu können.

Mittelinsel und Fussgängerüberquerungen

Auf Strassen mit einem Tempolimit von 20 km/h gibt es keine Strassenzüge mit Mittelinseln oder markierten Fussgängerüberquerungen. Bei einem Tempolimit von 30 km/h wird auf Strassen mit einer Mittelinsel schneller gefahren ($v_{ohne\ Mittelinsel}$ = 34.2 km/h; $v_{Mittelinsel}$ = 37 km/h). Diese Unterschiede sind signifikant ($p < 0.1$). Auf Strassen mit einem Tempolimit von 50 km/h wird mit einer Mittelinsel jedoch langsamer gefahren ($v_{ohne\ Mittelinsel}$ = 53.9 km/h; $v_{Mittelinsel}$ = 49.3 km/h). Diese Unterschiede sind ebenfalls signifikant ($p < 0.05$).

Es wird angenommen, dass Mittelinseln vor allem auf Strassen vorhanden sind, auf denen diese als nötig erachtet werden (z.B. aufgrund des Verkehrsaufkommens oder wegen der angrenzenden Umfeldnutzung). Auf dieser Art von Strassen kann die gefahrene Geschwindigkeit höher liegen.

Bei einem Tempolimit von 30 km/h wird auf Strassen mit einer Fussgängerüberquerung langsamer gefahren ($v_{ohne\ Fussgängerüberquerung}$ = 35.7 km/h; $v_{Fussgängerüberquerung}$ = 33.6 km/h). Diese Unterschiede sind signifikant ($p < 0.01$). Auf Strassen mit einem Tempolimit von 50 km/h wird mit einer Fussgängerüberquerung jedoch schneller gefahren ($v_{ohne\ Fussgängerüberquerung}$ = 51.4 km/h; $v_{Fussgängerüberquerung}$ = 54 km/h). Diese Unterschiede sind nicht signifikant ($p < 0.2$).

Vertikaler Versatz

In den Daten mit einem Tempolimit von 20 km/h und 50 km/h gibt es keine Strassenzüge mit einem vertikalen Versatz. Bei einem Tempolimit von 30 km/h wird auf Strassen ohne Versatz schneller gefahren ($v_{\text{ohne vertikalen Versatz}}$ = 34.8 km/h; $v_{\text{mit vertikalem Versatz}}$ = 34.2 km/h). Diese Unterschiede sind jedoch nicht signifikant.

Geschwindigkeitsschild

In den Daten mit einem Tempolimit von 20 km/h gibt es immer ein Geschwindigkeitsschild in der Nähe der Messstelle. Bei einem Tempolimit von 30 km/h wird auf Strassen mit einem Geschwindigkeitsschild langsamer gefahren ($v_{\text{ohne Signal}}$ = 35 km/h; $v_{\text{mit Signal}}$ = 33 km/h). Diese Unterschiede sind signifikant ($p < 0.05$). Auf Strassen mit einem Tempolimit von 50 km/h wird mit einem Geschwindigkeitsschild jedoch deutlich schneller gefahren ($v_{\text{ohne Signal}}$ = 52.7 km/h; $v_{\text{mit Signal}}$ = 60.8 km/h). Diese Unterschiede sind nicht signifikant ($p < 0.1$).

Fahrbahnbreite

Für die Analyse wurde entschieden, die Fahrbahnbreite anstelle der Fahrstreifenbreite zu betrachten. Die Fahrbahnbreite ist definiert als der Raum, der den Fahrzeugen zur Verfügung steht, und enthält keine allfälligen Radstreifen und/oder Parkplätze.

Abb. 14 zeigt den Zusammenhang zwischen Fahrbahnbreite und Fahrgeschwindigkeit entlang von Strassen mit einem Tempolimit von 20 km/h mit und ohne Gegenverkehr.

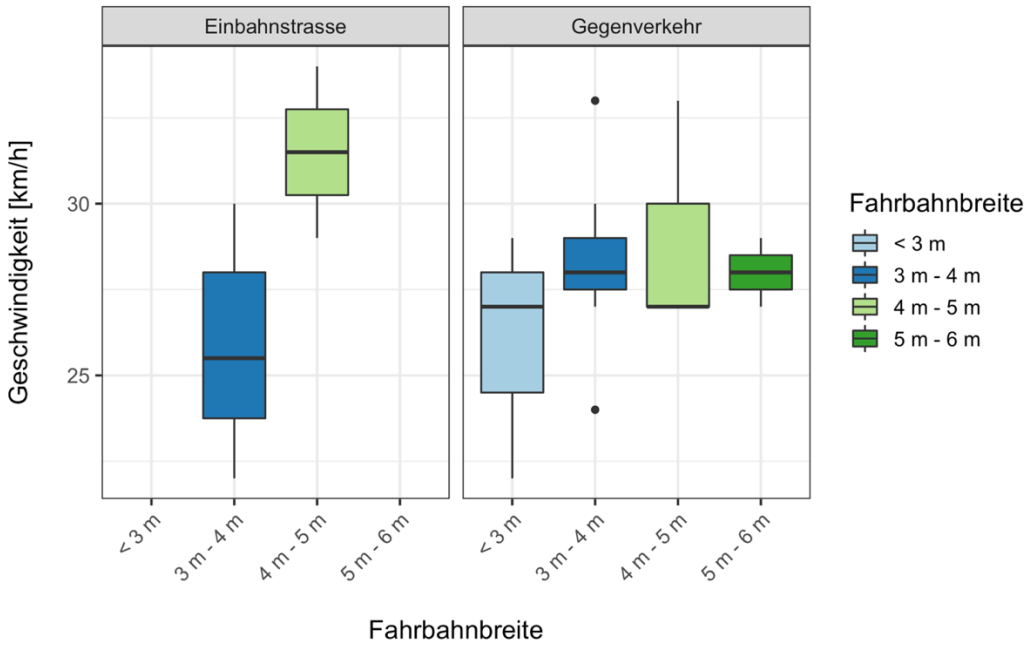


***Abb. 14** Fahrbahnbreite und gefahrene Geschwindigkeit (v_{85}), Tempo 20*

Auf Einbahnstrassen mit einer breiteren Fahrbahn wird schneller gefahren als auf Strassen mit einer schmaleren Fahrbahn (v_{3m-4m} = 25.6 km/h, n_{3m-4m} = 16; v_{4m-5m} = 31.2 km/h, n_{4m-5m} = 2). Diese Unterschiede sind signifikant ($p < 0.01$).

Auf Strassen mit Gegenverkehr wird bei einer breiteren Fahrbahn ebenfalls schneller gefahren als auf Strassen mit einer schmaleren Fahrbahn ($v_{<3m}$ = 26 km/h, $n_{<3m}$= 2; v_{3m-4m} = 28.3 km/h, n_{3m-4m} = 7; v_{4m-5m} = 29 km/h, n_{4m-5m} = 3; v_{5m-6m} = 28 km/h, n_{5m-6m} = 2). Diese Unterschiede sind jedoch nicht signifikant.

Abb. 15 zeigt den Zusammenhang zwischen Fahrbahnbreite und Fahrgeschwindigkeit entlang von Strassen mit einem Tempolimit von 30 km/h mit Gegenverkehr.

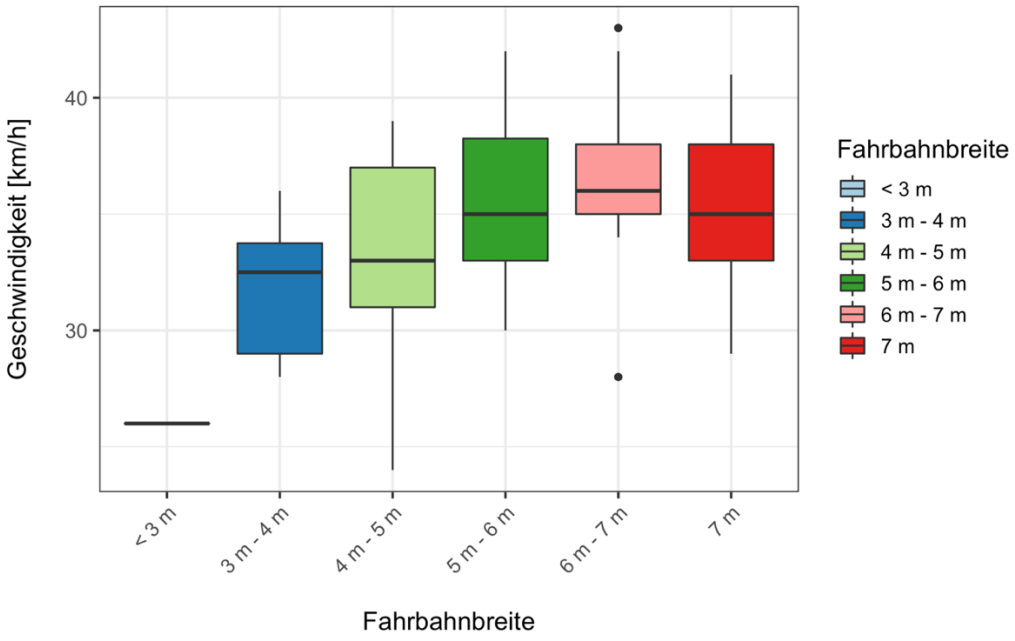


***Abb. 15** Fahrbahnbreite und gefahrene Geschwindigkeit (v_{85}), Tempo 30*

Auf Strassen mit Gegenverkehr wird bei einer breiteren Fahrbahn schneller gefahren als auf Strassen mit einer schmaleren Fahrbahn ($v_{< 3m}$ = 26 km/h, $n_{< 3m}$= 1; $v_{3m – 4m}$ = 31.7 km/h, $n_{3m – 4m}$ = 10; $v_{4m – 5m}$ = 33 km/h, $n_{4m – 5m}$ = 23; $v_{5m – 6m}$ = 35.6 km/h, $n_{5m – 6m}$ = 20; $v_{6m – 7m}$ = 36.3 km/h, $n_{6m – 7m}$ = 21; $v_{> 7m}$ = 35.3 km/h, $n_{> 7m}$ = 7). Die Geschwindigkeit auf Strassen mit einer Breite von 4 m bis 5 m ist nicht signifikant tiefer als die Geschwindigkeit entlang von Strassen breiter als 5 m ($p < 0.2$). Die Geschwindigkeit entlang von Strassen mit einer Breite von 3 m bis 4 m ist jedoch signifikant tiefer als die Geschwindigkeit entlang von Strassen mit einer Breite von 5 m bis 6 m ($p < 0.05$).

Abb. 16 zeigt den Zusammenhang zwischen Fahrbahnbreite und Fahrgeschwindigkeit entlang von Strassen mit einem Tempolimit von 50 km/h mit Gegenverkehr.

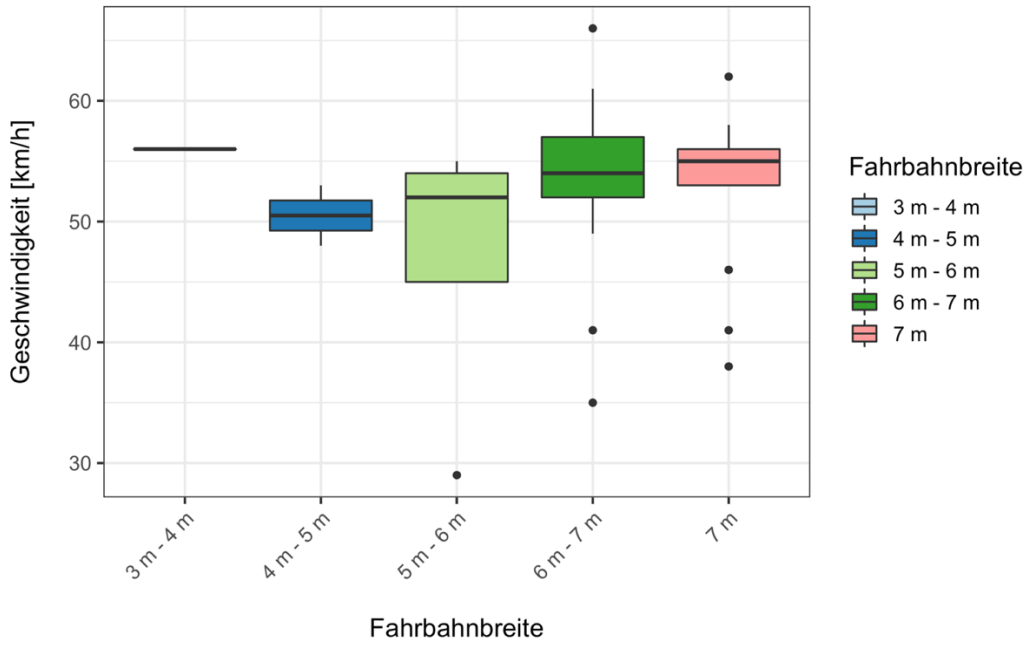


***Abb. 16** Fahrbahnbreite und gefahrene Geschwindigkeit (v_{85}), Tempo 50*

Auf Strassen mit Gegenverkehr wird bei einer breiteren Fahrbahn schneller gefahren als auf Strassen mit einer schmaleren Fahrbahn, ausser wenn die Fahrbahnbreite schmaler ist als 4 m. (v_{3m-4m} = 56 km/h, n_{3m-4m} = 1; v_{4m-5m} = 50.5 km/h, n_{4m-5m} = 2; v_{5m-6m} = 47 km/h, n_{5m-6m} = 5; v_{6m-7m} = 54.2 km/h, n_{6m-7m} = 35; $v_{>7m}$ = 53.3 km/h, $n_{>7m}$ = 17). Die Geschwindigkeit entlang der Strassen mit einer Breite von 5 m bis 6 m ist nicht signifikant tiefer als die Geschwindigkeit entlang der Strassen breiter als 6 m ($p < 0.15$).

Mittellinien

Bei der Auswertung der Trennstreifen in der Strassenmitte (Mittellinien) wurde entschieden, zwischen Strassen bei denen keine Mittellinien möglich sind (Strassenbreite < 5.5 Meter) und Strassen, die breiter als 5.5 Meter sind, zu unterscheiden. In den Daten mit einem Tempolimit von 20 km/h sind keine Mittellinien vorhanden.

Bei einem Tempolimit von 30 km/h wird auf Strassen mit Gegenverkehr ohne Mittellinie schneller gefahren als auf Strassen mit Leitlinie (breiter als 5.5 Meter) und auf schmalen Strassen ($v_{ohne\ Mittellinie}$ = 36.5 km/h; $v_{Leitlinie}$ = 35.2 km/h; $v_{Strasse < 5.5\ Meter}$ = 33.1 km/h). Ein Tukey-HSD-Test weist aus, dass nur die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Strassen ohne Mittellinie und Strassen schmaler als 5.5 Meter signifikant sind ($p < 0.05$).

Bei einem Tempolimit von 50 km/h wird auf Strassen mit Gegenverkehr und einer Sicherheitslinie schneller gefahren als auf Strassen mit Leitlinie (breiter als 5.5 Meter) und auf Strassen schmaler als 5.5 Meter ($v_{Sicherheitslinie}$ = 57 km/h; $v_{ohne\ Mittellinie}$ = 52.3 km/h; $v_{Leitlinie}$ = 53.7 km/h; $v_{Strasse < 5.5\ Meter}$ = 48.9 km/h). Ein Tukey-HSD-Test weist aus, dass die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen einer Sicherheitslinie und schmalen Strassen (< 5.5 Meter) signifikant sind (Differenz 9.3 km/h, $p < 0.05$). Die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Strassen mit einer Leitlinie und schmalen Strassen sind jedoch nicht signifikant ($p < 0.15$).

3.2.6 Fokus: Stadtraum

Grünraum

Bei einem Tempolimit von 20 km/h wird auf Strassen mit Grünraum schneller gefahren als auf Strassen ohne Begrünung ($v_{mit\ Grünraum}$ = 27.5 km/h; $v_{ohne\ Grünraum}$ = 27.1 km/h). Diese Geschwindigkeitsunterschiede sind nicht signifikant. Auf Strassen mit einem Tempolimit von 30 km/h wird bei Vorhandensein einer Begrünung ebenfalls schneller gefahren als auf

Strassen ohne Begrünung ($v_{mit\ Grünraum}$ = 36.4 km/h; $v_{ohne\ Grünraum}$ = 34.7 km/h. Diese Geschwindigkeitsunterschiede sind signifikant ($p < 0.05$). Auf Strassen mit einem Tempolimit von 50 km/h wird bei Vorhandensein einer Begrünung jedoch langsamer gefahren ($v_{mit\ Grünraum}$ = 52.5 km/h; $v_{mit\ Grünraum}$ = 53.3 km/h). Diese Geschwindigkeitsunterschiede sind nicht signifikant.

Es wird vermutet, dass der Grünraum für eine grössere Entfernung zu den Fussgängern sorgt und die Leute daher eher dazu neigen, schneller zu fahren.

Umfeldnutzung

Bei einem Tempolimit von 30 km/h wird auf Strassen mit wohnorientierter Nutzung langsamer gefahren als auf Strassen mit einer gemischten Nutzung oder Arbeitsnutzung (v_{Wohnen} = 33.2 km/h; $v_{Mischzone}$ = 35.5 km/h; $v_{Arbeiten}$ = 38.8 km/h). Die Unterschiede in der gefahrenen Geschwindigkeit zwischen Wohnen und Mischzone sind signifikant ($p < 0.05$), genauso wie die Unterschiede zwischen Wohnen und Arbeiten ($p < 0.05$).

Bei einem Tempolimit von 50 km/h wird auf Strassen mit wohnorientierter Nutzung schneller gefahren als auf Strassen mit einer gemischten Nutzung oder Arbeitsnutzung (v_{Wohnen} = 55.1 km/h; $v_{Mischzone}$ = 51.4 km/h; $v_{Arbeiten}$ = 52.4 km/h). Die Unterschiede in der gefahrenen Geschwindigkeit zwischen Wohnen und Mischzone sind nicht signifikant ($p < 0.1$). Die Unterschiede bei anderen Umfeldnutzungen sind ebenfalls nicht signifikant.

Entfernung Baulinie ab Strassenrand und Entfernung ab Mittellinie

Bei einem Tempolimit von 30 km/h wird auf jenen Strassen schneller gefahren, auf denen die Baulinie weiter von der Strassenmitte entfernt ist, mit Ausnahme von Strassen, bei denen die Baulinie sehr nahe an der Strassenmitte ist ($v_{< 10m}$ = 40 km/h, $n_{< 10m}$ = 4; $v_{10m – 20m}$ = 33.6 km/h, $n_{10m – 20m}$ = 69; $v_{20m – 30m}$ = 34.7 km/h, $n_{20m – 30m}$ = 21; $v_{>30m}$ = 37.6 km/h, $n_{>30m}$ = 4). Die Geschwindigkeiten auf Strassen mit einer kleinen Entfernung der Baulinie von der Strassenmitte (< 10 m) sind signifikant höher als auf Strassen mit einer Entfernung zwischen 10 und 20 m ($p < 0.01$).

Bei einem Tempolimit von 50 km/h wird auf jenen Strassen schneller gefahren, auf denen die Baulinie weiter von der Strassenmitte entfernt ist, mit Ausnahme von Strassen, bei denen die Baulinie sehr nahe an der Strassenmitte ist ($v_{< 10m}$ = 51.7 km/h, $n_{< 10m}$ = 15; $v_{10m – 20m}$ = 52.8 km/h, $n_{10m – 20m}$ = 36; $v_{20m – 30m}$ = 54.6 km/h, $n_{20m – 30m}$ = 20; $v_{>30m}$ = 53 km/h, $n_{>30m}$ = 20). Die Geschwindigkeitsunterschiede sind nicht signifikant.

3.2.7 Statistische Modelle

Zur weiteren Bewertung der Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Strassenraumgestaltung sind Regressionsmodelle geschätzt worden. Die gefahrene Geschwindigkeit stellt dabei die abhängige Variable dar, während die Gestaltungselemente als unabhängige Variablen benutzt werden, um die gefahrene Geschwindigkeit zu erklären.

Bei der Schätzung der Modelle wurden die Variablen dem Modell einzeln auf Basis der erwarteten Erklärungskraft hinzugefügt. Aufgrund von Korrelationen zwischen den unabhängigen Variablen kann es dabei vorkommen, dass sich durch das Hinzufügen von Variablen Parameterwerte ändern oder diese nicht mehr statistisch signifikant sind. In diesen Fällen wird jeweils abgewogen, welche der Variablen einerseits der Erklärungskraft des Modells besser dient und andererseits auf Basis der deskriptiven Statistiken und Hypothesen besser ins Modell passt.

Tempo 30

Bei den Modellschätzungen sind nur Messungen entlang von Strassen mit den Nutzungen «Wohnen», «Arbeiten» und «Mischzone» berücksichtigt worden. Auch wurden nur Strassen mit Gegenverkehr betrachtet. Insgesamt bleiben mit dieser Vorgehensweise 86

Beobachtungen für die Modellschätzung übrig. Die Modellergebnisse sind in Tab. 10 dargestellt.

Entlang der Strassen mit einer Fahrbahn breiter als 5 Meter wird signifikant schneller gefahren. Bei Strassen mit einer Breite zwischen 5 Meter und 6 Meter wird im Vergleich zu den schmaleren Strassen um 2.7 km/h schneller gefahren; bei Strassen breiter als 6 Meter sogar um 3.65 km/h.

Wenn in der Nähe des Messorts kein Geschwindigkeitsschild und keine Markierung vorhanden ist, wird um 2 km/h schneller gefahren. Entlang der Strassen ohne Parkplätze wird im Vergleich zu Strassen mit Parkplätzen um 1.54 km/h schneller gefahren.

Messungen entlang von Strassen in der Romandie weisen eine höhere Geschwindigkeit auf. Es kann sein, dass andere, im Modell nicht berücksichtigte Faktoren zu einer höheren Geschwindigkeit führen. Es kann aber auch sein, dass die Wahl der Messorte in der Romandie anders ist und es dadurch auf den gewählten Strassen weniger Verkehr gibt.

Tab. 10 *Modellergebnisse Tempo 30*

Parameter	**Parameter-wert**	**Std. Error**	**t-Test**	**Sign.**
Konstante	30.4	0.81	37.74	
Fahrbahnbreite				
Fahrbahnbreite < 5 Meter [Referenz]	-			
Fahrbahnbreite 5 Meter bis 6 Meter	2.73	0.96		**
Fahrbahnbreite > 6 Meter	3.65	0.87	4.19	***
Geschwindigkeitsschild				
Vorhanden	-			
Nicht vorhanden	2	0.78	2.56	*
Parkplätze				
Vorhanden	-			
Nicht vorhanden	1.54	0.85	1.82	.
Region				
Deutschschweiz	-			
Romandie &Tessin	2.34	0.9	2.59	*
Modellgüte				
Anzahl Beobachtungen	86			
Adjusted Rho-Square	0.3			
Signifikanz 0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1				

Tempo 50

Bei den Modellschätzungen sind nur Messungen entlang von Strassen mit den Nutzungen «Wohnen», «Arbeiten» und «Mischzone» berücksichtigt worden. Auch wurden nur Strassen mit Gegenverkehr betrachtet. Insgesamt bleiben mit dieser Vorgehensweise 60 Beobachtungen für die Modellschätzung übrig. Die Modellergebnisse sind in Tab. 11 dargestellt.

Entlang der Strassen mit einer Fahrbahn breiter als 5.5 Meter oder Strassen mit einer Leitlinie wird schneller gefahren als auf Strassen schmaler als 5.5 Meter; der Unterschied beträgt 8.1 km/h.

Entlang der Strassen ohne Parkplätze wird im Vergleich zu Strassen mit Parkplätzen um 4.54 km/h schneller gefahren. Im Gegensatz zu der Analyse mit einzelnen Variablen konnten bei der Modellschätzung signifikante Effekte für Radstreifen beobachtet werden. Entlang der Strassen mit Radstreifen wird im Vergleich zu Strassen ohne Radstreifen um 3.67 km/h schneller gefahren.

Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen Messungen in der Deutschschweiz und der Romandie beobachtet werden.

Tab. 11 *Modellergebnisse Tempo 50*

Parameter	**Parameter-wert**	**Std. Er-ror**	**t-Test**	**Sign.**
Konstante	49.195	2.481	19.833	***
Trennung und Fahrbahnbreite				
Leitlinie oder breiter als 5.5 Meter [Referenz]	-			
Keine Trennung und schmaler als 5.5 Meter	-8.179	2.326	-3.516	***
Sicherheitslinie	3.927	1.963	2	.
Parkplätze				
Vorhanden	-			
Nicht vorhanden	4.54	1.931	2.352	*
Radstreifen				
Vorhanden	-			
Nicht vorhanden	-3.671	1.502	-2.443	*
Mittelinsel				
Vorhanden	-			
Nicht vorhanden	5.484	1.87	2.932	**
Umfeldnutzung				
Wohnen [Referenz]	-			
Mischzone, Arbeiten	-3.276	1.306	-2.508	*
Modellgüte				
Anzahl Beobachtungen	60			
Adjusted Rho-Square	0.36			
Signifikanz 0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1				

3.3 Neue Messungen

3.3.1 Methode und Wahl der Messtrecken

Die meisten bestehenden Geschwindigkeitsmessungen wurden entweder zu einem einzigen Zeitpunkt oder vor und nach einer Strassenumgestaltung durchgeführt. Angesichts der grossen Anzahl von Messungen wurde beschlossen, einen neuartigen Ansatz zu verwenden, um Anpassungen der Fahrgeschwindigkeit aufgrund von Änderungen der Strassenraumgestaltung zu bewerten.

Bei dem verfolgten Ansatz wurde die Fahrgeschwindigkeit in kurzer Entfernung entlang derselben Strasse an zwei Querschnitten mit unterschiedlicher Strassenraumgestaltung gemessen (< 400 Meter). Der Vorteil dieser Herangehensweise ist, dass viele mögliche Störfaktoren gleich bleiben. Die Fahrerpopulation ist die gleiche, die Hierarchie der Strasse

im grösseren Netz bleibt gleich und die angrenzende Umfeldnutzung ändert sich nicht gross.

Da die Anzahl der im Rahmen dieser Forschungsarbeit durchführbaren Messungen Beschränkungen unterlag, war die Auswahl der Messstrecken sehr selektiv. Konkret wird für Tempo 50 die Wirkung von Mehrzweckstreifen, Radstreifen und Kernfahrbahn untersucht.

Die folgenden Kriterien wurden bei der Wahl der Messstrecke benutzt:

- Unterschied in Gestaltungsmerkmalen innerhalb kurzer Distanz
- Messorte möglichst nicht in der Nähe von Kreuzungen
- Konstante Umfeldnutzung

In Tab. 12 sind die ausgewählten Messstellen aufgeführt. In den folgenden Abschnitten werden die Messstellen näher beschrieben und es wird eine Zusammenfassung der Ergebnisse präsentiert. Die Ergebnisse werden qualitativ diskutiert und in den Kontext des Messortes gesetzt. Bei den Auswertungen werden die folgenden Zeitperioden betrachtet:

- Wochentage von 09:00 bis 15:00 Uhr, um die Messungen nicht durch mögliche Staus zu den Stosszeiten zu verfälschen
- Wochenenden von 06:00 bis 18:00 Uhr
- Nachts von 20:00 bis 06:00 Uhr um einen Eindruck von der Fahrgeschwindigkeit bei tiefem Verkehrsaufkommen zu erhalten

***Tab. 12** Messorte Neue Messungen*

Messort	Strasse, Gemeinde	Gestaltungsmerkmale
1	Binningen	Mit/ohne Mehrzweckstreifen
2	St. Jakobstrasse, Muttenz	Mit Mehrzweckstreifen und Radstreifen/mit Mehrzweckstreifen ohne Radstreifen
3	Reinacherstrasse, Münchenstein	Bauliche Trennung/ohne Trennung
4	Bielstrasse, Oberwil	markierter Radstreifen, Kernfahrbahn/separater Radstreifen
5	Riehenring, Basel	Radstreifen im Mischverkehr/separater Radstreifen

3.3.2 Messort 1: Mehrzweckstreifen

Beschreibung

Die zwei Messpunkte bei Messort 1 sind in Abb. 17 abgebildet; die wichtigsten Merkmale sind in Tab. 13 und Tab. 14 aufgelistet. Messpunkt 1.1 wird durch Parkfelder an einer Seite der Strasse in südliche Richtung markiert. Die Spuren werden durch einen Mehrzweckstreifen getrennt. Messort 1.2 hat ebenfalls einige Parkfelder an einer Seite der Strasse in südliche Richtung, die Spuren werden jedoch durch eine Sicherheitslinie getrennt. Die Messorte sind etwa 400 Meter voneinander entfernt und liegen beide in einem Wohngebiet.

***Abb. 17** Standort Messort 1*

***Tab. 13** Merkmale Messort 1*

Merkmal	Wert
Tempolimit	50 km/h
Strassenfunktion	Verbindungsstrasse
Distanz zwischen Messorten	400 Meter
Gemeinde/Kanton	Binningen, Basel-Land
Datum	Messung 1.1: 9.10.2020 bis 16.10.2020 Messung 1.2: 16.10.2020 bis 23.10.2020
Bemerkungen	Parkfelder auf der Strasse direkt nach Messort 1.2

***Tab. 14** Merkmale Messort 1 (pro Richtung)*

Merkmal	Messpunkt 1.1		Messpunkt 1.2	
	Süd	Nord	Süd	Nord
Fahrstreifen-breite	3.3 m	2.8 m	3.8 m	6.6 m
Trennung	Mehrzweckstreifen		Leitlinie	
Radstreifen	Nein	Nein	Nein	Nein
Parkieren	Nein	Ja, auf der Strasse	Nein	Ja, direkt nach dem Messort

Ergebnisse

Tab. 15 listet die Ergebnisse für die Messungen bei den Messorten 1.1 und 1.2 auf.

An den Wochentagen liegt die v_{85} tagsüber unter dem Tempolimit von 50 km/h oder ist gleich 50 km/h; nachts liegt die v_{85} bei 53 km/h und damit leicht über dem vorgegebenen Tempolimit.

An den Wochentagen liegt die v_{85} in nördliche Richtung bei Messort 1.1 bei 50 km/h. Bei Messort 1.2 liegt die Geschwindigkeit bei 49 km/h.

In südliche Richtung kann der gleiche Trend beobachtet werden: Bei Messort 1.1 beträgt die v_{85} 50 km/h, bei Messort 1.2 liegt sie bei 49 km/h.

Zwischen den Fahrrichtungen gibt es bei beiden Messorten keinen Unterschied in der gefahrenen Geschwindigkeit (v_{85}).

Tab. 15** Ergebnisse Messort 1 (pro Richtung**)

Zeitperiode	**Kennzahl**	**Messpunkt 1.1**		**Messpunkt 1.2**	
		Nord	**Süd**	**Nord**	**Süd**
Wochentag	Anzahl Fahrzeuge [PKW]	13849	9095	16047	13408
	$v_{mittelwert}$ [km/h]	43.8	45.1	44.1	44.9
	v_{50} [km/h]	45	46	45	45
	v_{85} [km/h]	50	50	49	49
Wochenende	Anzahl Fahrzeuge [PKW]	7252	5543	8168	7290
	$v_{mittelwert}$ [km/h]	46.4	46.8	45.3	45.9
	v_{50} [km/h]	47	47	46	46
	v_{85} [km/h]	51	51	50	50
Nacht	Anzahl Fahrzeuge [PKW]	5973	3680	5693	4340
	$v_{mittelwert}$ [km/h]	48	48.5	47.1	47.2
	v_{50} [km/h]	48	49	47	47
	v_{85} [km/h]	52	53	51	51

3.3.3 Messort 2: Mehrzweckstreifen und Radstreifen

Beschreibung

Die zwei Messpunkte bei Messort 2 sind in Abb. 18 abgebildet; die wichtigsten Merkmale sind in Tab. 16 und Tab. 17 aufgelistet. Messpunkt 2.1 wird in südliche Richtung durch Parkfelder an einer Seite der Strasse gekennzeichnet. Die Spuren werden durch einen Mehrzweckstreifen getrennt. Messort 2.2 hat Radstreifen auf beiden Seiten und in südliche Richtung ebenfalls einige Parkfelder an einer Seite der Strasse; die Spuren werden durch einen Mehrzweckstreifen getrennt. Die Messorte sind etwa 120 Meter voneinander entfernt und liegen beide in einem Wohngebiet, in dem sich auch ein Einkaufszentrum befindet.

***Abb. 18** Standort Messort 2*

***Tab. 16** Merkmale Messort 2*

Merkmal	**Wert**
Tempolimit	50 km/h
Strassenfunktion	Verbindungsstrasse
Distanz zwischen Messorten	120 Meter
Strasse	St. Jakobstrasse
Gemeinde/Kanton	Muttenz, Basel-Land
Datum	Messung 2.1: 23.10.2020 – 30.10.2020 Messung 2.2: 31.10.2020 – 6.11.2020
Bemerkungen	-

***Tab. 17** Merkmale Messort 2 (pro Richtung)*

Merkmal	**Messpunkt 2.1**		**Messpunkt 2.2**	
	Nord	**Süd**	**Nord**	**Süd**
Fahrstreifenbreite	3.3 m	3.2 m	2.9 m	2.9 m
Trennung	Mehrzweckstreifen		Mehrzweckstreifen	
Radstreifen	Nein	Nein	Ja	Ja
Parkieren	Nein	Ja, erhöht	Nein	Nein

Ergebnisse

Tab. 18 listet die Ergebnisse für die Messungen bei den Messorten 2.1 und 2.2 auf.

An den Wochentagen sowie am Wochenende liegt die v_{85} jeweils über dem Tempolimit von 50 km/h.

An den Wochentagen liegt die v_{85} bei Messort 2.1 in nördliche Richtung bei 52 km/h. Bei Messort 2.2 beträgt die Geschwindigkeit 51 km/h.

Am Wochenende liegt die v_{85} bei Messort 2.1 in nördliche Richtung bei 52 km/h; bei Messort 2.2 beträgt die Geschwindigkeit 55 km/h.

Bei Messort 2 liegen die Geschwindigkeiten am Messpunkt 2.1 ohne Radstreifen um 1 km/h höher als am Messpunkt 2.2 mit Radstreifen. Es wird angenommen, dass die Trennung, kombiniert mit dem Radstreifen und der damit einhergehenden Verengung der Strasse, einen geringfügigen Einfluss auf die gefahrene Geschwindigkeit in nördliche Richtung hat. Andere Faktoren, wie z.B. die Anwesenheit einer Fussgängerschutzinsel 50 Meter südlich des Messpunkts, können aber auch einen Einfluss auf die Reduktion der Geschwindigkeit haben.

***Tab. 18** Ergebnisse Messort 2 (pro Richtung)*

Zeitperiode	**Kennzahl**	**Messort 2.1**		**Messort 2.2**	
		Nord	**Süd**	**Nord**	**Süd**
Wochentag	Anzahl Fahrzeuge [PKW]	2013	1110	6467	-
	$v_{mittelwert}$ [km/h]	46.4	47.3	45.2	-
	v_{50} [km/h]	47	47	45	-
	v_{85} [km/h]	52	52	51	-
Wochenende	Anzahl Fahrzeuge [PKW]	4804	3141	2064	-
	$v_{mittelwert}$ [km/h]	47.1	48.2	50.6	-
	v_{50} [km/h]	48	48	51	-
	v_{85} [km/h]	52	53	55	-
Nacht	Anzahl Fahrzeuge [PKW]	1177	1422	1320	-
	$v_{mittelwert}$ [km/h]	49.6	47.7	47.9	-
	v_{50} [km/h]	50	48	48	-
	v_{85} [km/h]	55	53	54	-

3.3.4 Messort 3: Bauliche Trennung

Beschreibung

Die zwei Messpunkte bei Messort 3 sind in Abb. 19 dargestellt; die wichtigsten Merkmale sind in Tab. 19 und Tab. 20 aufgelistet. Messpunkt 3.1 wird durch einen Radstreifen auf einer Seite der Strasse in nördliche Richtung gekennzeichnet. Die Spuren werden durch eine Leitlinie getrennt. Messort 3.2 hat beidseits einen Radstreifen; in südliche Richtung mündet dieser in einen abgetrennten Radweg. Die Spuren werden durch eine bauliche

Trennung getrennt. Die Messpunkte sind etwa 120 Meter voneinander entfernt und liegen beide in einem Gebiet mit überwiegend industrieller Nutzung.

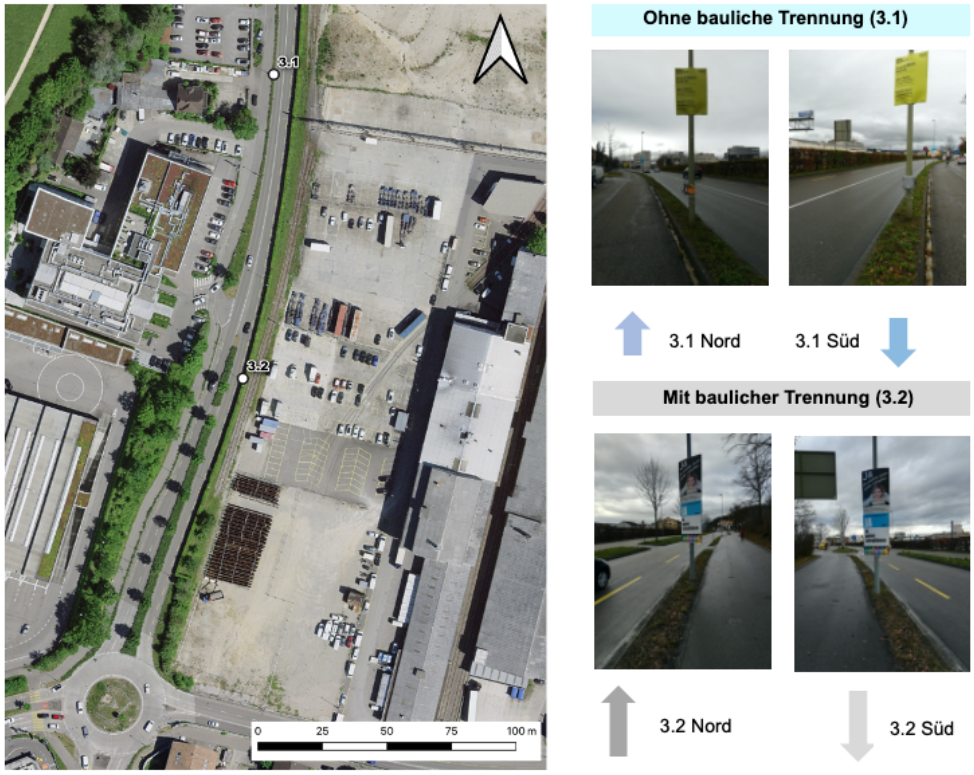


Abb. 19 *Standort Messort 3*

Tab. 19 *Merkmale Messort 3*

Merkmal	**Wert**
Tempolimit	50 km/h
Strassenfunktion	Verbindungsstrasse
Distanz zwischen Mess-orten	120 Meter
Strasse	Reinacherstrasse 24 (3.1), Reinacherstrasse 28 (3.2)
Gemeinde/Kanton	Münchenstein, Basel-Land
Datum	Messung 3.1: 13.11.2020 bis 20.11.2020 Messung 3.2: 06.11.2020 bis 13.11.2020
Bemerkungen	Messung 3.2 ist etwa 120 Meter von einer grösseren Kreuzung entfernt

***Tab. 20** Merkmale Messort 3 (pro Richtung)*

Merkmal	**Messpunkt 3.1**		**Messpunkt 3.2**	
	Nord	**Süd**	**Nord**	**Süd**
Fahrstreifen-breite	2.9 m	3.1 m	3.3 m	3.3 m
Trennung	Sicherheitslinie		Bauliche Trennung	
Radstreifen	Ja	Nein	Ja	Ja, mündet in abgetrennten Radweg
Parkieren	Nein	Nein	Nein	Nein

Ergebnisse

Tab. 21 listet die Ergebnisse für die Messungen bei den Messorten 3.1 und 3.2 auf.

An den Wochentagen sowie am Wochenende liegt die v_{85} jeweils über dem Tempolimit von 50 km/h.

In nördliche Richtung liegt die v_{85} an den Wochentagen bei Messort 3.1 bei 52 km/h. Bei Messort 3.2 beträgt die Geschwindigkeit 49 km/h. Am Wochenende liegt die v_{85} bei Messort 3.1 bei 54 km/h; bei Messort 3.2 liegt die Geschwindigkeit bei 52 km/h.

In südliche Richtung liegt die v_{85} an den Wochentagen bei Messort 3.1 bei 54 km/h. Bei Messort 3.2 beträgt die Geschwindigkeit 51 km/h. Am Wochenende liegt die v_{85} bei Messort 3.1 bei 55 km/h; bei Messort 3.2 liegt die Geschwindigkeit bei 50 km/h.

Bei Messort 3 liegen die Geschwindigkeiten am Messpunkt 3.2 mit baulicher Trennung und Radstreifen 2–3 km/h tiefer als am Messpunkt 3.1 ohne bauliche Trennung. Es wird angenommen, dass die bauliche Trennung, kombiniert mit dem einmündenden Radstreifen und der dadurch wahrgenommenen Verengung der Strasse, einen Einfluss auf die gefahrene Geschwindigkeit in südliche Richtung hat.

***Tab. 21** Ergebnisse Messort 3 (pro Richtung)*

Zeitperiode	**Kennzahl**	**Messpunkt 3.1**		**Messpunkt 3.2**	
		Süd	**Nord**	**Süd**	**Nord**
Wochentag	Anzahl Fahrzeuge [PKW]	10394	15145	11432	13314
	$v_{mittelwert}$ [km/h]	48.5	47.8	43.6	44.8
	v_{50} [km/h]	48	48	45	45
	v_{85} [km/h]	54	52	51	49
Wochen-ende	Anzahl Fahrzeuge [PKW]	4108	6154	5720	4082
	$v_{mittelwert}$ [km/h]	50	49.5	45.6	46.4
	v_{50} [km/h]	50	49	45	47
	v_{85} [km/h]	55	54	50	52

Nacht	Anzahl Fahrzeuge [PKW]	2552	3172	2396	3163
	$v_{mittelwert}$ [km/h]	48.8	48.9	46.3	45
	v_{50} [km/h]	48	49	46	45
	v_{85} [km/h]	54	53	52	50

3.3.5 Messort 4: Kernfahrbahn

Beschreibung

Die zwei Messpunkte von Messort 4 sind in Abb. 20 dargestellt; die wichtigsten Merkmale sind in Tab. 22 und Tab. 23 aufgelistet. Messort 4.1 wird durch Radstreifen auf beiden Seiten der Strasse gekennzeichnet. Es gibt keine Spurtrennung. Messort 4.2 hingegen hat einen abgesetzten Radweg auf beiden Strassenseiten. Die Spuren werden durch eine Leitlinie getrennt. Die Messorte sind etwa 125 Meter voneinander entfernt.

Abb. 20 *Standort Messort 4*

Tab. 22 *Merkmale Messort 4*

Merkmal	**Wert**
Tempolimit	50 km/h
Strassenfunktion	Verbindungsstrasse
Distanz zwischen Messorten	125 Meter
Strasse	Bielstrasse 41 (4.1), Bielstrasse 71 (4.2)
Gemeinde/Kanton	Oberwil, Basel-Land
Datum	Messpunkt 4.1: 27.11.20 bis 4.12.20 Messpunkt 4.2: 4.12.20 bis 11.12.20

Bemerkungen	Ortseinfahrt von Messort 4.2 nach Messort 4.1 (Richtung West)

Tab. 23 *Merkmale Messort 4 (pro Richtung)*

Merkmal	**Messpunkt 4.1**		**Messpunkt 4.2**	
	Ost	**West**	**Ost**	**West**
Fahrstreifen-breite	2.5 m	2.5 m	3.0 m	3.0 m
Trennung	Kernfahrbahn		Leitlinie	
Radstreifen	Ja	Ja	Ja, abgetrennter Radweg	Ja, abgetrennter Radweg
Parkieren	Nein	Nein	Nein	Nein

Ergebnisse

Tab. 24 listet die Ergebnisse für die Messungen bei den Messpunkten 4.1 und 4.2 auf.

An den Wochentagen, am Wochenende und während der Nacht liegt die v_{85} jeweils über dem Tempolimit von 50 km/h.

In westliche Richtung liegt die v_{85} an den Wochentagen bei Messpunkt 4.1 bei 53 km/h; bei Messpunkt 4.2 beträgt die Geschwindigkeit 54 km/h.

In östliche Richtung liegt die v_{85} an den Wochentagen bei Messpunkt 4.1 bei 50 km/h. Bei Messpunkt 4.2 beträgt die Geschwindigkeit 52 km/h.

Bei Messort 4.1 kann zwischen den Richtungen ein Unterschied in der gefahrenen Geschwindigkeit beobachtet werden. Ortsauswärts liegt die Geschwindigkeit bei Messort 4.1 um etwa 3 km/h höher.

Bei Messort 4.2 liegt die Geschwindigkeit ortsauswärts (bei der Kernfahrbahn mit Radstreifen) um etwa 1 km/h tiefer. Die Geschwindigkeit ortseinwärts liegt bei der Kernfahrbahn zwischen 1–2 km/h tiefer. Es wird angenommen, dass die Verengung der Fahrstreifen, die Anwesenheit eines Radstreifens und das Fehlen einer Leitlinie einen Einfluss auf die Geschwindigkeit hat.

Tab. 24 *Ergebnisse Messort 4 (pro Richtung)*

Zeitperiode	**Kennzahl**	**Messpunkt 4.1**		**Messpunkt 4.2**	
		Ost	**West**	**Ost**	**West**
Wochentag	Anzahl Fahrzeuge [PKW]	10396	8167	10932	8840
	$v_{mittelwert}$ [km/h]	46.6	49.3	48.1	49.4
	v_{50} [km/h]	47	49	48	49
	v_{85} [km/h]	50	53	52	54
Wochen-ende	Anzahl Fahrzeuge [PKW]	5522	4698	5278	4553
	$v_{mittelwert}$ [km/h]	47.5	49.7	48.6	49.6

	v_{50} [km/h]	47	50	48	49
	v_{85} [km/h]	51	53	52	54
Nacht	Anzahl Fahrzeuge [PKW]	2488	2292	2354	2332
	$v_{mittelwert}$ [km/h]	48	50.8	49.2	49.4
	v_{50} [km/h]	48	51	49	49
	v_{85} [km/h]	51	55	53	54

3.3.6 Messort 5: Radstreifen

Beschreibung

Die zwei Messpunkte bei Messort 5 sind in Abb. 21 dargestellt; die wichtigsten Merkmale sind in Tab. 25 und Tab. 26 aufgelistet. Messort 5.1 wird durch Radstreifen auf beiden Strassenseiten sowie Parkfelder an einer Strassenseite gekennzeichnet. Die Spuren werden durch eine Leitlinie getrennt. Messort 5.2 hingegen hat keine Radstreifen, aber einen abgesetzten, doppelspurigen Radweg an einer Seite der Strasse. Die Spuren werden durch eine Sicherheitslinie getrennt. Die Messorte sind etwa 250 Meter voneinander entfernt.

***Abb. 21** Standort Messort 5*

***Tab. 25** Merkmale Messort 5*

Merkmal	**Wert**
Tempolimit	50 km/h
Strassenfunktion	Verbindungsstrasse

Distanz zwischen Messorten	250 Meter
Gemeinde/Kanton	Basel, Basel-Stadt
Datum	Messung 5.1: 6.11.2020 bis 13.11.2020 Messung 5.2: 2.2.2021 bis 15.2.2021
Bemerkungen	Die Messung bei Messort 5.2 hat während 2 Wochen stattgefunden statt 1 Woche

Tab. 26 *Merkmale Messort 5 (pro Richtung)*

Merkmal	**Messpunkt 5.1**		**Messpunkt 5.2**	
	Nord	**Süd**	**Nord**	**Süd**
Fahrstreifenbreite	2.7 m	2.7 m	Doppelspurig (3.6 m/3.3 m)	3.0 m
Trennung	Leitlinie		Sicherheitslinie	
Radstreifen	Ja, markiert	Ja, markiert	Nein	Ja, separater doppelspuriger Radweg, durch Grünraum getrennt
Parkieren	Ja	Ja	Nein	Nein

Ergebnisse

Tab. 27 listet die Ergebnisse für die Messungen bei den Messorten 5.1 und 5.2 auf:

An den Wochentagen sowie am Wochenende liegt die v_{85} unter dem Tempolimit von 50km/h; nachts liegt die v_{85} bei 55 km/h.

An den Wochentagen liegt die v_{85} bei Messort 5.2 bei 48 km/h; bei Messort 5.1 bei 46 km/h. Am Wochenende sind die Geschwindigkeitsunterschiede geringer und die v_{85} liegt bei Messort 5.2 in nördliche Richtung bei 48 km/h; bei Messort 5.1 bei 47 km/h.

In südliche Richtung sind die Geschwindigkeitsunterschiede grösser und betragen an den Wochentagen sowie am Wochenende jeweils 6 km/h zwischen den Messorten.

Bei Messort 5 liegt die Geschwindigkeit bei einer engeren Spur sowie der Anwesenheit eines Radstreifens um 2 km/h tiefer. Wenn zusätzlich Parkplätze vorhanden sind, liegt die Geschwindigkeit um 6 km/h tiefer. Jedoch liegt Messort 5.1 nur 80 Meter von einer Kreuzung entfernt und aus diesem Grund könnte die Kreuzung einen zusätzlichen Einfluss auf die gefahrene Geschwindigkeit haben.

Tab. 27 *Ergebnisse Messort 5 (pro Richtung)*

Zeitperiode	**Kennzahl**	**Messpunkt 5.1**		**Messpunkt 5.2**	
		Süd	**Nord**	**Süd**	**Nord**
Wochentag	Anzahl Fahrzeuge [PKW]	6102	4432	14773	11406
	$v_{mittelwert}$ [km/h]	37.5	40.5	43.5	42.3

	v_{50} [km/h]	38	41	43	42
	v_{85} [km/h]	43	46	49	48
Wochen-ende	Anzahl Fahrzeuge [PKW]	4971	4433	9447	7910
	$v_{mittelwert}$ [km/h]	37.8	41.2	44	42.7
	v_{50} [km/h]	38	41	44	43
	v_{85} [km/h]	44	47	50	48
Nacht	Anzahl Fahrzeuge [PKW]	2488	2292	2354	2332
	$v_{mittelwert}$ [km/h]	48	50.8	49.2	49.4
	v_{50} [km/h]	48	51	49	49
	v_{85}-[km/h]	51	55	53	54

3.4 Fazit

Dieses Kapitel konzentrierte sich auf die Auswertung bestehender und die Bewertung neu durchgeführter Geschwindigkeitsmessungen. Bestehende Geschwindigkeitsmessungen waren aus verschiedenen Quellen verfügbar.$_{Tab.}$ 28 fasst die Ergebnisse der einzelnen statistischen Tests im Fahrbereich zusammen. Die Wirkung eines Gestaltungselements wird immer bezogen auf eine Referenzkategorie geprüft. Zum Beispiel ergibt sich die Wirkung einer Mittellinie aus dem Vergleich mit Strassen ohne Leitlinien mit dem gleichen Tempolimit.

Bei bestimmten Elementen konnte aufgezeigt werden, dass sie bei verschiedenen Tempolimiten die gleiche Wirkung haben. Die Anwesenheit von Parkplätzen führt sowohl entlang der Strassen mit einem Tempolimit von 30 km/h als auch bei Strassen mit einem Tempolimit von 50 km/h zu einer tieferen Geschwindigkeit. Einerseits kann es sein, dass Strassen mit Parkplätzen schmaler sind und aus diesem Grund eine tiefere Geschwindigkeit gemessen wird. Anderseits kann es aber auch sein, dass parkierte Autos als Gefahr wahrgenommen werden oder die Geschwindigkeit wegen der wiederkehrenden Parkvorgänge reduziert wird. Schlussendlich lässt sich sagen, dass parkierte Autos wegen *Retinal Streaming* eine visuelle Wirkung haben und dadurch die gefahrene Geschwindigkeit höher eingeschätzt wird als sie tatsächlich ist.

Eine schmalere Strassenbreite führt zu einer tieferen Geschwindigkeit, jedoch sind die Unterschiede bei einem Signifikanzniveau von 0.05 nicht immer signifikant. Entlang von Einbahnstrassen mit einem Tempolimit von 20 km/h wird langsamer gefahren, wenn die Strasse schmaler als 4 m ist. Dies trifft auch auf Strassen mit Gegenverkehr und einem Tempolimit von 30 km/h zu. Es wird angenommen, dass Autofahrende auf diesen Strassen auf eine Lücke im Gegenverkehr warten müssen (Velofahrende, PKW).

Bestimmte Elemente haben jedoch eine unterschiedliche Wirkung bei verschiedenen Tempolimiten. Strassen mit einer Mittelinsel und einem Tempolimit von 30 km/h zeigen eine signifikant höhere Geschwindigkeit. Es kann sein, dass Strassen mit einer Mittelinsel eher Hauptachsen sind und breiter gestaltet sind. Auf Strassen mit einer Mittelinsel und einem Tempolimit von 50km/h wird hingegen signifikant langsamer gefahren. Die lokale Verengung sorgt hier wahrscheinlich für eine Anpassung der Geschwindigkeit.

Das Vorhandensein eines Geschwindigkeitsschilds entlang von Strassen mit einem Tempolimit von 30 km/h sorgt für eine tiefere Geschwindigkeit. Entlang der Strassen mit einem Tempolimit von 50 km/h wird jedoch schneller gefahren, wenn es ein Signal gibt. Es wird angenommen, dass diese Schilder nur dann platziert werden, wenn eine Anpassung der

Geschwindigkeit als nötig erachtet wird. In den anderen Fällen sind sich die Fahrer des allgemein geltenden Tempolimits von 50 km/h innerorts bewusst.

***Tab. 28** Zusammenfassung Auswertung Messungen im Fahrbereich*

Gestaltungs-element	**Wert**	**Tempolimit**		
		20 km/h	**30 km/h**	**50 km/h**
Gegenverkehr	Einbahnstrasse	K	R	K
	Gegenverkehr	K	E	K
Parkplätze [eine Seite oder beide Seiten]	Ja	K	R	R
	Nein	K	E	E
Radstreifen [eine Seite oder beide Seiten]	Ja	-	K	K
	Nein	-	K	K
Horizontaler Versatz [Parkieren]	Ja, Parkieren	K	R	K
	Ja, Pfosten oder Markierung	K	K	K
	Nicht vorhanden	K	E	K
Horizontaler Versatz [Seite]	Ja, kontinuierlich	K	K (+)	K
	Ja, wechselseitig	K	K (-)	K
	Nicht vorhanden	K	K (+)	K
Mittelinsel	Ja	-	K (+)	R
	Nein	-	K (-)	E
Fussgängerüberquerung	Ja	-	E	K
	Nein	-	R	K
Vertikaler Versatz	Ja	K	K	K
	Nein	K	K	K
Geschwindigkeitsschild	Ja	-	R	E
	Nein	-	E	R
Fahrbahnbreite	< 3 m	-	-	-
	3 m – 4 m	R (nur Einbahn)	R	K
	4 m – 5 m	E (nur Einbahn)	K	K
	5 m – 6 m	E (nur Einbahn)	E	K (-)
	6 m – 7 m	E (nur Einbahn)	K	K (+)
	> 7 m	-	K	K (+)
Mittellinie	keine Trennung	-	E	K
	Leitlinie	-	K	K

Nicht nötig (Fahrstreifenbreite < 5.5 m)	-	R	R
Sicherheitslinie	-	K	E

Anmerkung. K = Keine Wirkung; R = Reduktion der Geschwindigkeit, E = Erhöhung der Geschwindigkeit, K (-) = Reduktion der Geschwindigkeit, nicht signifikant, K (+) = Erhöhung der Geschwindigkeit, nicht signifikant, - = keine oder zu wenig Beobachtungen.

Bei der Auswertung der Gestaltungselemente im Bereich Fussgänger- und Stadtraum wurde entschieden, nur die Ergebnisse für «Grünraum» und Umfeldnutzung zu zeigen (Tab. 29). Bei einem Tempolimit von 30 km/h wird entlang von Strassen mit Grünraum schneller gefahren. Es kann sein, dass eine grössere Entfernung zu den Fussgängern sowie eine grössere wahrgenommene Entfernung zu den Gebäuden zu einer höheren Geschwindigkeit führt.

Die Umfeldnutzung hat bei verschiedenen Tempolimiten eine unterschiedliche Wirkung. Bei einem Tempolimit von 30 km/h wird entlang der Strassen eines Wohngebiets langsamer gefahren als entlang der Strassen einer Mischzone. Es wird erwartet, dass entlang der Strassen eines Wohngebiets mehr Gestaltungselemente vorhanden sind, welche die Geschwindigkeit beeinflussen.

Bei einem Tempolimit von 50 km/h wird entlang der Strassen eines Wohngebiets jedoch schneller gefahren als entlang der Strassen einer Mischzone (nicht signifikant). Es wird angenommen, dass es entlang von Strassen in einem Wohngebiet ein tieferes Verkehrsaufkommen und möglicherweise weniger querende zu Fuss Gehende und Velofahrende gibt, sodass dadurch die durchschnittliche gefahrene Geschwindigkeit höher liegt.

Tab. 29 *Zusammenfassung Auswertung Messungen im Bereich «Fussgänger- und Stadtraum»*

Gestaltungselement	**Wert**	**20 km/h**	**30 km/h**	**50 km/h**
Grünraum	Ja	K	E	K
	Nein	K	R	K
Umfeldnutzung	Arbeiten	-	E	K
	Ausbildung	-	-	-
	Grün/Freizeit	-	-	-
	Mischzone	K	E	K (-)
	Wohnen	K	R	K (+)

Anmerkungen. K = keine Wirkung; R = Reduktion der Geschwindigkeit, E = Erhöhung der Geschwindigkeit, K (-) = Reduktion der Geschwindigkeit, nicht signifikant, K (+) = Erhöhung der Geschwindigkeit, nicht signifikant, - = keine oder zu wenig Beobachtungen

Das Ziel der neuen Messungen bestand darin, herauszufinden, ob entlang der gleichen Strasse bei unterschiedlicher Gestaltung mit einer anderen Geschwindigkeit gefahren wird. Insgesamt wurde bei 10 Messpunkten entlang von 5 Strassen mit einem Tempolimit von 50 km/h für eine Woche die Geschwindigkeit gemessen. Eine deskriptive Auswertung zeigt, dass kleine Geschwindigkeitsunterschiede festgestellt werden können. Wenn auf Basis der kleinen Anzahl an Messpunkten eine Aussage getroffen werden soll, so lässt sich sagen, dass bei einer grösseren Entfernung zwischen den Fahrstreifen (z.B. wegen Mehrzweckstreifen) leicht schneller gefahren wird. Jedoch kann z.B. ein Radstreifen oder eine bauliche Trennung dazu führen, dass mit der gleichen Trennung langsamer gefahren wird.

Eine weitere Analyse der Wirkung von verschiedenen Gestaltungselementen kann helfen, den Effekt von bestimmten Strassenquerschnitten zu überprüfen. Jedoch zeigt diese Analyse bereits auf, welche Elemente eine grössere Wirkung haben als andere.

4 VR-Fahrsimulatorexperiment

4.1 Einführung

Ziel des VR-Fahrsimulatorexperiments ist die valide Messung der Auswirkungen von ausgewählten Gestaltungselementen auf die gefahrene Geschwindigkeit. Ein weiteres Ziel ist die Validierung des VR-Fahrsimulators als Messmethode durch den Vergleich mit Messungen in realen Strassenzügen. Das VR-Experiment wird für diejenigen Tempozonen durchgeführt, in denen es den grössten Wissensbedarf und den grössten Gestaltungsspielraum gibt. Für Tempo-30-Zonen (siedlungsorientierte Strassen) und Tempo 50 ist die Datengrundlage bereits ausreichend. Forschungslücken ergeben sich für Hauptverkehrsstrassen Strassen innerorts für Tempo 30 sowie Strassen ausserorts mit Tempo 80.

Die VR-Experimente beantworten damit die folgende Forschungsfrage (Forschungsfrage 3): Was ist der quantifizierbare Einfluss von verschiedenen, teilweise in der Schweiz heute noch nicht eingesetzten Gestaltungselementen auf die Geschwindigkeitswahl für folgende Strassentypen:

- Hauptverkehrstrasse innerorts mit Tempo 30?
- Strasse ausserorts mit Tempo 80?

Zunächst folgt eine Übersicht zu den Grundlagen zur Wahrnehmung und der Datenerhebung in VR auf Basis der Literatur. Anschliessend beschreibt der Versuchsplan das experimentelle Design, die experimentellen Konditionen, den Parcours im VR-Fahrsimulator, die Stichprobe sowie die geplanten Auswertungen. Anschliessend werden die Ergebnisse aus dem Experiment dargestellt und erläutert.

4.2 Grundlagen zur Wahrnehmung und Datenerhebung in VR

Die Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung und Datenerhebung in VR lassen sich in drei Kategorien einteilen: Faktoren der Person, der VR-Umgebung sowie der Reaktionen. Die einzelne Person nimmt VR-Umgebungen unterschiedlich war. Die VR-Umgebung beeinflusst wiederum das Ausmass der erlebten Presence (d.h. wie realistisch eine virtuelle Umgebung wahrgenommen wird). Die in Abb. 22 dargestellten Faktoren nehmen Einfluss auf das Fahrverhalten im VR-Fahrsimulator und beeinflussen damit die Validität der Messungen.

Nachfolgend wird der Stand der Literatur zu den einzelnen Faktoren beschrieben. Grundsätzlich zeigt die Literatur, dass das Fahrverhalten im Fahrsimulator mehrheitlich mit dem Fahrverhalten in der Realität übereinstimmt oder mit ausgewählten Massnahmen in Übereinstimmung gebracht werden kann (Wynne et al., 2019).

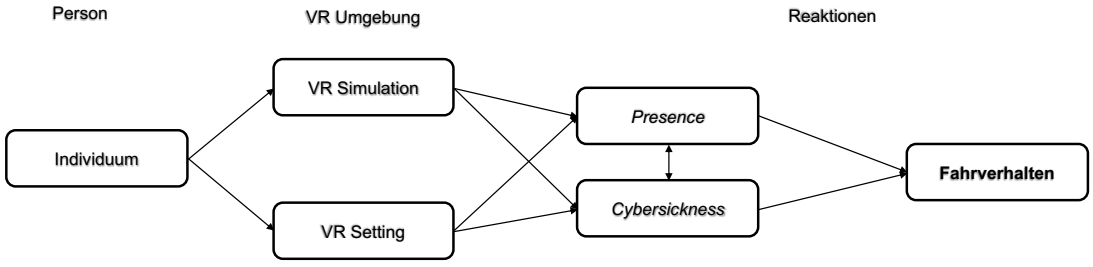


***Abb. 22** Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten in virtueller Umgebung*

4.2.1 Individuum

Das räumliche Vorstellungsvermögen beeinflusst, wie genau eine Distanzeinschätzung im virtuellen Raum im Vergleich zur Realität erfolgt (Ziemer et al., 2009). Für die korrekte

Einschätzung von Position, Distanz und Tiefe dürfen zudem die Parallaxe und die Stereopsis (räumliches Sehen) einer Person nicht eingeschränkt sein (Kemeny & Panerai, 2003). Wenn ein Individuum auf Erfahrungen im virtuellen Raum zurückgreifen kann oder sich an die virtuelle Umgebung gewöhnen kann, erfolgen Geschwindigkeitseinschätzungen mit grösserer Genauigkeit (Hill & Salzman, 2012). Distanzen werden im virtuellen Raum von Individuen tendenziell systematisch unterschätzt (Thompson et al., 2004).

Individuumsbezogene Einflussfaktoren auf die Geschwindigkeitswahl sind ausserdem:

- Psychologische Faktoren wie Motivation, Gewohnheiten und persönlicher Komfort (Ahie et al., 2015)
- Alter, Geschlecht (Sadia et al., 2018)
- Stereopsis (Kemeny & Panerai, 2003)
- Anfälligkeit auf Bewegungskrankheit (Cybersickness) (Kemeny, 2014; Weech et al., 2019).

4.2.2 VR-Simulation

In Fahrsimulatoren sind Rückmeldungen respektive Informationen über die eigene Bewegung, welchen vom vestibulären Organ wahrgenommen werden, massgebend für die Geschwindigkeits- und Lenkkontrolle. Der optische Fluss der Bildsequenzen (optical flow) ist bei der Wahrnehmung von räumlichen Intervallen (Strassenmarkierungen) und somit für die Zeiteinschätzung zwischen Beobachterin/Beobachter und Objekten relevant und daher einer der wichtigsten visuellen Hinweise. Zudem ist für eine korrekte Einschätzung der Geschwindigkeit in virtuellen Umgebungen ein Sichtfeld von mindestens 120° notwendig (Kemeny & Panerai, 2003). Hervorzuheben ist, dass die Qualität von Computergrafiken keinen Zusammenhang mit der Genauigkeit von Distanzschätzungen im virtuellen Raum hat (Thompson et al., 2004).

Durch die Simulation von Echtzeitobjekten in den virtuellen Raum kann die Usability und Presence der VR-Simulation erhöht werden (Bottone & Johnsen, 2016). Cybersickness und Presence beeinflussen sich gegenseitig und können somit auch mit identischen Massnahmen reduziert bzw. gefördert werden (Weech et al., 2019).

4.2.3 VR-Setting

Im Allgemeinen sollte auf eine möglichst komfortable Ausstattung geachtet werden und die Aufgaben respektive Tätigkeiten sollten zeitlich eher kurz sein. Um dem Auftreten von Cybersickness vorzubeugen, helfen kurze Intervalle und Pausen sowie das Trinken von Wasser. Weiter unterstützt eine Trainingseinheit die Adaption an die virtuelle Situation. Zudem soll auch auf ein komfortables head mounted display (HMD) mit hoher Auflösung geachtet werden (Rangelova et al., 2020).

4.2.4 Presence

Presence bezeichnet das Gefühl, wie realistisch und authentisch eine virtuelle Umgebung von Personen empfunden wird. Beeinflusst wird die Presence durch das VR-Setting, die VR-Simulation sowie negativ durch eine Neigung zu Cybersickness (siehe nächster Abschnitt). Das Level der Authentizität kann durch die Messung des Ausmasses, zu welchem Personen in virtuellen Interaktionen und Umgebungen eintauchen, bestimmt werden. Messbar ist dies mit dem Authentizitätsindex. Auf einer Skala zur Messung von «Immersion», «Kontrollgefühl» (feeling of control) und «Kinetose» (Cybersickness) bewies sich das HMD als das Display mit der höchsten Presence (Kronqvist et al., 2016). Presence kann damit auch als Ausmass der Fähigkeit gesehen werden, mit welcher Personen auf Situationen im virtuellen Raum so reagieren können, wie sie es in der Realität tun würden (Slater et al., 2009).

4.2.5 Cybersickness (Kinetose)

Die Cybersickness, auch Simulator Sickness oder Motion Sickness genannt, wird durch den visuell-vestibulären Konflikt hervorgerufen. Es handelt sich um Diskrepanzen, welche zwischen der Wahrnehmung über das visuelle und vestibuläre System entstehen (Kemeny, 2014).

4.2.6 Fahrverhalten

Daten zum Fahrverhalten können mit verschiedenen Methoden erhoben werden. Parameter zur Fahrzeugkontrolle wie Geschwindigkeit, Beschleunigung und Standardabweichung der Spurposition können einfach in realen oder simulierten Fahrten gemessen werden (Dony, 2019). Identisch wird auch die Authentizität von virtuellem Fahrverhalten anhand mehrerer Messgrössen (Geschwindigkeit, Geschwindigkeitsvariabilität, Seitenlage, gesamte Fahrperformance und Anzahl der Fahrfehler) beurteilt (Wynne et al., 2019). Als Fahrfehler (driving errors) gelten fehlerhafte Fahrzeugposition (vehicle position) wie Auffahren, falsches Einreihen und Einparken und die Missachtung von Strassenmarkierungen, das Nicht-Einhalten der Spur (lane maintenance) in Fahrzeugkolonen sowie Unter- oder Übersteuern in Kurven, falsche Geschwindigkeitsanpassungen (speed regulation) wie zu schnelles oder zu langsames Fahren, Rollstopps, abruptes Bremsen und Beschleunigen sowie die falsche Geschwindigkeit beim Einreihen. Ausserdem falscher Einsatz des Blinkers (signaling) bei Richtungsänderungen, Nicht-Anpassen an die aktuelle Verkehrssituation und unangemessene Reaktion auf andere Verkehrsteilnehmende (adjustments to stimuli/traffic signs) sowie eine mangelhafte Beobachtung (visual scanning) des Verkehrs wie Blicke in die Fahrzeugspiegel und Seitenblicke bei den Richtungswechseln (Shechtman et al., 2009). Bei der allgemeinen Fahrleistung (overall driving performance) können unterschiedliche Kriterien wie die Befolgung von Verkehrsregeln, Kenntnisse über Verkehrssignale, erlaubte Geschwindigkeiten, Erkennung von Verkehrsführungen, Befahren von Kreuzungen, Anpassung an die aktuelle Verkehrssituation, Selbstvertrauen bei hoher Fahrgeschwindigkeit, aber auch Arbeitsgedächtnis (Merkfähigkeit), Multitasking und Fehlererkennung (H. C. Lee, Cameron, et al., 2003) differenziert werden. Selbstbeurteilungen mittels Befragung geben Aufschluss über Fahrkomfort und Realitätstreue des Simulators selbst. Weiter werden Parameter wie Herzfrequenz, Atmung, Haltung, Gehirn- und Muskelaktivitäten verwendet, um Reaktionen von Fahrenden in Simulatoren zu erfassen (Dony, 2019).

Die Genauigkeit der Fahrsimulatoren hat keinen eindeutigen Zusammenhang mit der Validität der Resultate. Hochgenaue Simulatoren liefern nicht zwangsläufig validere Ergebnisse. Einige Simulatoren ermöglichen valide Ergebnisse für bestimmte Messungen, wiederum aber nicht für andere. Wichtig ist, dass für eine entsprechende Messung angemessene Daten vom Simulator geliefert werden (Wynne et al., 2019).

4.3 Beschreibung der Gestaltungselemente

4.3.1 Prinzipien zur Auswahl der Gestaltungselemente

Die Auswahl der Gestaltungselemente erfolgte einerseits auf Basis der Literaturrecherchen (vgl. Kapitel 2) und andererseits auf Basis der gemessenen Geschwindigkeitswahl (vgl. Kapitel 3). Weiter erfolgte eine Absprache mit den Fachpersonen aus der Begleitkommission. Untersucht wird ausschliesslich die Wirkung von Elementen aus dem Bereich der Fahrbahn.

Da punktuelle Massnahmen nur eine räumlich beschränkte Wirkung zeigen, wurden für das VR-Experiment ausschliesslich kontinuierliche Massnahmen ausgewählt (vgl. auch Kapitel 2). Zusätzlich ist die Anwendung von punktuellen Massnahmen auf siedlungsorientierte Tempo-30-Strassen beschränkt. Die bisherige Forschung zur Wirkung der Gestaltungselemente (vgl. Kapitel 2) weist darauf hin, dass die ausgewählten Gestaltungselemente für Tempo 30 und für Tempo 80) das Potential bergen, Einfluss auf die gefahrene Geschwindigkeit zu nehmen.

Ein weiteres Auswahlkriterium war, zusätzlich Gestaltungselemente einzubeziehen, zu denen für die Schweiz keine Messungen vorliegen. Darum wurde darauf geachtet, für jedes

Temporegime mehrere Gestaltungselemente auszuwählen, welche in der Schweiz noch nicht im Einsatz sind.

Zudem wurde vorwiegend die Wirkung von einzelnen Gestaltungselementen untersucht. Es wurden in den Experimentalkonditionen bei Tempo 30 keine Kombinationen von Gestaltungselementen einbezogen. Bei Tempo 80 wurde die Wirkung von einer Kombination untersucht. Die restlichen drei Experimentalkonditionen bei Tempo 80 waren wiederum auf die Wirkung eines Gestaltungselementes fokussiert. Dieses Vorgehen ermöglicht die eindeutige Quantifizierung der Wirkung einzelner Elemente. Eine zusätzliche Messung der Wirkung von Kombinationen von Gestaltungselementen würde den Einbezug weiterer Testpersonen und weiterer 3D-Programmierung bedingen. Dies war für das vorliegende Projekt aus ressourcentechnischen Gründen nicht möglich.

4.3.2 Gestaltungselemente für Tempo-30-Strecke

In Strecken mit Tempo 30 wurden die folgenden sechs Gestaltungselemente untersucht (siehe Tab. 30).

Tab. 30 *Auswahl der Gestaltungselemente für Tempo 30*

Art der Gestaltungselemente	**Gestaltungselement**
Fahrbereich: Markierung: FGSO	Breites Band
	Mehrzweckstreifen
Fahrbereich: Radstreifen	Radstreifen an der Fahrbahn
Fahrbereich: Parkplätze	Seitliche Parkplätze
Fahrbereich: Trennung der Fahrstreifen	Keine Leitlinie
Fussgängerraum	Bäume und Sitzbänke auf dem Trottoir

Die Wirkungsweise der Gestaltungselemente wird auf Basis verschiedener psychologischer Prozesse begründet (Elliott et al., 2003). Die Wirkung bezieht sich dabei auf den Autoverkehr. Tab. 31 gibt eine Übersicht der Wirkungsweise der Gestaltungselemente in Tempo-30-Zonen.

Tab. 31 *Wirkungsweise der Gestaltungselemente für Tempo 30*

Gestaltungselement	**Wirkungsweise bzgl. Autoverkehr**	**Psychologische Prozesse**
Breites Band	Visuelle Einengung	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden) (Elliott et al., 2003)
Mehrzweckstreifen	Trennung	Verringerung der subjektiven Gefahr/des Risikos
Radstreifen an der Fahrbahn	Mögliche andere Verkehrsteilnehmende (Velo)/Abstimmungsbedarf und Verbreiterung des Fahrbahnraumes	Entweder: Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden, Verletzung der Velofahrenden) Oder: Verringerung der subjektiven Gefahr/des Risikos
Seitliche Parkplätze	Mögliche andere Verkehrsteilnehmende (aussteigende Personen, wegfahrende Autos)/Abstimmungsbedarf mit anderen Verkehrsteilnehmenden und	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der anderen Fahrenden) (Elliott et al., 2003)

	Retinal Streaming	
Keine Leitlinie	Fehlende Trennung/Abstimmungsbedarf mit anderen Verkehrsteilnehmenden	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden) (Elliott et al., 2003)
Bäume und Sitzbänke auf dem Trottoir	Kognitive Belastung Strassenbild: Selbsterklärend, dass andere Verkehrsteilnehmende anwesend sind	Erhöhung der zu verarbeitenden Informationen führt zu einer Erhöhung der Aufmerksamkeit und Reduktion der Geschwindigkeit

Die Wirkung jedes Gestaltungselements wurde jeweils in einer experimentellen Kondition untersucht (vgl. Tab. 32). Eine Strecke ohne Gestaltungselement diente als Referenzstrecke (Minimalkondition).

***Tab. 32** Experimentelle Konditionen für Tempo 30*

Experimentelle Kondition	**Gestaltungselement**	**Tempo**	**Visualisierung**
Minimalkondition	-	30	
Experimentelle Kondition 1	Breites Band	30	
Experimentelle Kondition 2	Radstreifen an der Fahrbahn	30	
Experimentelle Kondition 3	Mehrzweckstreifen	30	
Experimentelle Kondition 4	Seitliche Parkplätze	30	
Experimentelle Kondition 5	Keine Leitlinie	30	
Experimentelle Kondition 6	Bäume und Sitzbänke auf dem Trottoir	30	

Um die Wirkung der Gestaltungselemente isolieren zu können, hatte die Fahrbahn immer die gleichen Abmessungen. Lediglich die Gestaltungselemente variierten und veränderten die wahrgenommene Dimension der Fahrbahn. Abb. 23 zeigt einen Querschnitt der Fahrbahn in der Minimalkondition mit den Bezeichnungen der einzelnen Bestandteile.

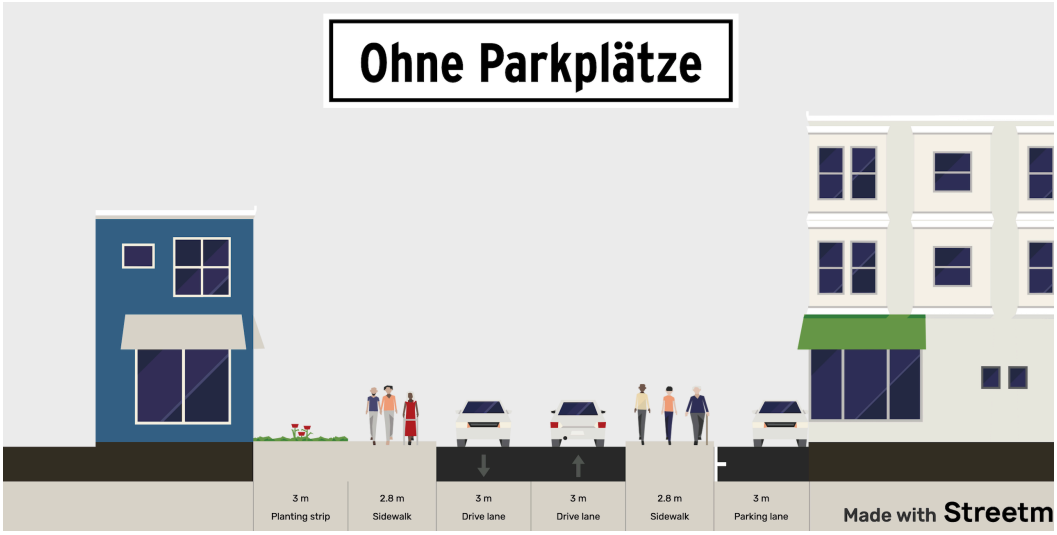


Abb. 23 *Querschnitt der Fahrbahn in der Minimalkondition*

Die Abmessungen der rechten Fahrbahn in den jeweiligen experimentellen Konditionen sind in Tab. 33 ersichtlich. Die linke Fahrbahn hat die identischen Abmessungen in umgekehrter Reihenfolge. Farblich markiert sind die Abweichungen von der Minimalkondition aufgrund des Gestaltungselements.

Bei allen Konditionen wurde die gleiche Fahrstreifenbreite vorgesehen. Bei Parkplätzen wurde kein Umfeldzuschlag berücksichtigt und die Normen sind berücksichtigt. Die Baulinie beträgt in allen Konditionen zwischen 18.0 und 18.1 Meter. Beim Mehrzweckstreifen blieb die Baulinie damit gleich, der Platz für den Mehrzweckstreifen wurde beim Trottoir und den Vorgärten kompensiert.

Tab. 33 *Abmessungen der Gestaltungselemente bei Tempo 30*

EK	**Gestaltungs-element**	**Breite der rechten Fahrbahn**						
		Leitlinie	Mehr-zweck-streifen	Fahrstrei-fen	Radstrei-fen	Breites Band	Grünraum	Parkieren
0	Minimalkondi-tion	0.15	0	3	0	0	0	0
1	Breites Band	0.15	0	2.5	0	0.5	0	0
2	Radstreifen	0.15	0	3	2	0	0	0
3	Mehrzweck-streifen	0	2.6	3	0	0	0	0
4	Seitliche Park-plätze	0.15	0	3	0	0	0	2
5	Keine Leitlinie	0	0	3	0	0	0	0
6	Bäume und Sitzbänke	0.15	0	3	0	0	1	0

4.3.3 Gestaltungselemente für Tempo-80-Strecken

In Strecken mit Tempo 80 wurde die Wirkung von vier Gestaltungselementen untersucht (siehe Tab. 34). Auch hier wurde die Fahrstreifenbreite über alle Konditionen gleich gehalten.

***Tab. 34** Auswahl der Gestaltungselemente für Tempo 80*

Art der Gestaltungselemente	Gestaltungselement
Markierung: FGSO	Breites Band
	Breites Band mit Muster
	Breites Band mit Muster und breite Mittellinie mit Muster
Trennung der Fahrstreifen	Keine Leitlinie

Die Wirkung der Gestaltungselemente wird auf Basis von unterschiedlichen psychologischen Prozessen begründet (Elliott, 2003). Die Wirkung bezieht sich dabei auf den Autoverkehr. Tab. 35 gibt eine Übersicht der Wirkungsweise der Gestaltungselemente in Tempo-80-Zonen.

***Tab. 35** Wirkungsweise der Gestaltungselemente für Tempo 80*

Gestaltungselemente	Wirkungsweise	Psychologische Prozesse
Breites Band	Optische Einengung	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden) (Elliott et al., 2003)
Breites Band mit Muster	Optische Einengung Retinal Streaming	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden) (Elliott et al., 2003) Hinweisreize in der Peripherie erhöhen die wahrgenommene Geschwindigkeit
Breites Band mit Muster und breite Mittellinie mit Muster	Optische Einengung Retinal Streaming Trennung	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden) (Elliott et al., 2003) Hinweisreize in der Peripherie erhöhen die wahrgenommene Geschwindigkeit Oder: Verringerung der subjektiven Gefahr/des Risikos
Keine Leitlinie	Fehlende Trennung	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden) (Elliott et al., 2003)

Jedes Gestaltungselement wurde in einer experimentellen Kondition untersucht (vgl. Tab. 36). Eine Strecke ohne Gestaltungselement diente als Referenzstrecke (Minimalkondition). Eine neutrale Kondition mit Tempo 50 diente als Übergang zu den experimentellen Konditionen.

Tab. 36 *Experimentelle Konditionen für Tempo 80*

Experimentelle Kondition	Gestaltungselement	Tempo	Visualisierung
Minimalkondition	-	80	
Experimentelle Kondition 1	Breites Band	80	
Experimentelle Kondition 2	Breites Band mit Muster	80	
Experimentelle Kondition 3	Breites Band mit Muster und breite Mittellinie mit Muster	80	
Experimentelle Kondition 4	Keine Leitlinie	80	

Um die Wirkung der Gestaltungselemente isolieren zu können, hatte die Fahrbahn immer die gleichen Abmessungen. Lediglich die Gestaltungselemente variierten und veränderten die wahrgenommene Dimension der Fahrbahn.

Die Abmessungen der rechten Fahrbahn in den jeweiligen experimentellen Konditionen sind in Tab. 37 ersichtlich. Die linke Fahrbahn hat die identischen Abmessungen in umgekehrter Reihenfolge. Farblich markiert sind die Abweichungen von der Minimalkondition aufgrund des Gestaltungselements.

Tab. 37 *Abmessungen der Gestaltungselemente in Tempo 80*

EK	Gestaltungselement	Breite der rechten Fahrbahn			
		Leitlinie	Fahrstreifen	Aussenmarkierung	Strassenrand bis Markierung
0	Minimalkondition	0.15	3	0.15	0.4
1	Breites Band	0.15	3	0.45	0.1
2	Breites Band mit Muster	0.15	3	0.45	0.1
3	Breites Band mit Muster und breite Mittellinie mit Muster	0.45	3	0.4	0
4	Keine Leitlinie	0	3	0.15	0.5

4.4 Methodisches Vorgehen

In einem VR-Fahrsimulator durchfahren die Studienteilnehmenden einen Parcours mit allen experimentellen Konditionen der zwei Strassentypen Tempo 30 und Tempo 80. Anschliessend beantworten die Teilnehmenden Fragen zu den befahrenen Streckenabschnitten und zu ihrer Person.

4.4.1 Versuchsablauf

Das Experiment im VR-Fahrsimulator umfasst fünf Schritte (Tab. 38). Der Hauptteil des Experiments ist die Fahrt durch einen Parcours im VR-Fahrsimulator (Schritt 3). Die Gesamtdauer des Experiments beträgt ungefähr 45 Minuten.

Tab. 38 *Versuchsablauf*

Schritt	Inhalt	Instrument	Dauer
1	Information zu Zweck und Ablauf des Experiments (Informed Consent)*		5’
2	Instruktion VR-Fahrsimulator und Durchfahrt einer Übungsstrecke	VR-Fahrsimulator	5’
3	Durchfahrt Parcours im VR-Fahrsimulator	VR-Fahrsimulator	15’
4	Fragebogen zu Streckenabschnitten (bevorzugte und sichere Geschwindigkeit, Risiko und Komplexität des Streckenabschnitts), Fahrerlebnis in VR, momentanes Wohlbefinden, Fahrstil, Fahrpraxis, Erfahrung mit VR, Soziodemografie	Pen & Paper	15’
5	Debriefing		5’
Total			Ca. 45’

* Die Teilnehmenden erhalten zu Beginn des Experiments keine Information über das Ziel der Untersuchung. Sie werden lediglich darüber informiert, dass ihr normales Fahrverhalten untersucht wird.

4.4.2 Übungsstrecke im VR-Fahrsimulator

Um sich an eine Fahrt im VR-Fahrsimulator zu gewöhnen, absolvieren die Studienteilnehmenden eine Teststrecke. Das Ziel der Teststrecke ist, dass die Personen ein Gefühl für die Sensibilität der Pedale (Gas, Bremse) und der Steuerung (Steuerrad) entwickeln. Zudem können sie sich an die Umgebung in VR gewöhnen.

Zu Beginn der Teststrecke werden die Teilnehmenden mündlich instruiert über die zu fahrende Geschwindigkeit. Dadurch können die Teilnehmenden ein Gefühl für die Sensibilität des Gaspedals entwickeln. Durch die tiefen Geschwindigkeiten zu Beginn wird zudem das Risiko eines Übersteuerns reduziert. Das Abkommen von der Fahrbahn aufgrund eines Übersteuerns kann durch die starken Bewegungen schneller zu Simulator Sickness führen. Die Teilnehmenden werden aufgefordert zuerst 20 km/h zu fahren (während 30 Sek.), danach müssen sie 30 km/h fahren (während 30 Sek.) und schlussendlich 50 km/h (während 30 Sek.). Anschliessend werden sie aufgefordert, gemäss der Signalisation und möglichst normal wie im Alltag zu fahren.

4.4.3 Parcours im VR-Fahrsimulator

Im VR-Fahrsimulator durchfahren die Teilnehmenden eine zusammenhängende Strecke durch mehrere kleinere Ortschaften. Dabei wird abwechselnd ein Strassentyp mit Tempo 30 (Hauptverkehrsstrasse innerorts) und ein Strassentyp mit Tempo 80 (Überlandstrasse ausserorts) durchfahren. Eine neutrale Kondition mit Tempo 50 bildet den Übergang. Die Teilnehmenden durchfahren im Parcours nacheinander alle experimentellen Konditionen.

Das Erscheinungsbild der Ortschaften in der VR-Simulation ist am Schweizer Mittelland orientiert. Die Fahrt im VR-Fahrsimulator soll möglichst realitätsnah erscheinen, indem der

Parcours als zusammenhängende Strecke konzipiert ist. Dadurch entsteht der Eindruck einer gewöhnlichen Autofahrt und die externe Validität wird erhöht.

Nachfolgend ist der Parcours schematisch dargestellt (vgl. Abb. 24).

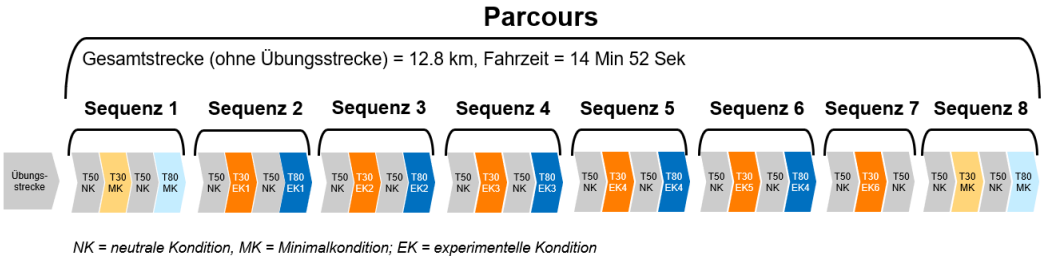


***Abb. 24** Aufbau des Parcours mit acht Sequenzen*

Die Gesamtstrecke des Parcours umfasst eine Strecke von 12 800 Metern und kann bei exakter Einhaltung der Geschwindigkeitsangabe in 14 Minuten und 52 Sekunden durchfahren werden. Der Parcours besteht insgesamt aus acht Sequenzen. Jede Sequenz umfasst eine Strecke von 1 700 Metern und kann (bei Einhaltung der Geschwindigkeitsangabe) in 1 Minute und 56 Sekunden durchfahren werden.

Eine Sequenz enthält vier Abschnitte und hat mit Ausnahme der Sequenz 7 einen identischen Aufbau. Eine Sequenz beginnt mit einer neutralen Kondition mit Tempo 50 (Abschnitt 1). Tempo 50 wurde gewählt, um eine klare Differenzierung zu den experimentell untersuchten Strassentypen zu schaffen. Zudem dient dieser Abschnitt als Verbindungselement zwischen den Strassentypen und erleichtert den Geschwindigkeitswechsel. In Abschnitt 2 folgt eine experimentelle Kondition bzw. die Minimalkondition für den Strassentyp in Tempo 30. Darauf folgt wiederum eine neutrale Kondition mit Tempo 50 (Abschnitt 3). Dieser Abschnitt dient dazu, die Wirkung der vorangegangenen experimentellen Kondition aufzuheben und bildet den Übergang zur nächsten experimentellen Kondition. Abschnitt 4 besteht aus einer experimentellen Kondition bzw. der Minimalkondition für den Strassentyp in Tempo 80. Tab. 39 zeigt den exemplarischen Aufbau einer Sequenz.

In Sequenz 7 wird nur eine experimentelle Kondition in Tempo 30 untersucht, weshalb diese Sequenz lediglich aus drei Abschnitten besteht und mit einer neutralen Kondition (Tempo 50) endet.

***Tab. 39** Aufbau einer Sequenz*

Abschnitt	Beschreibung der Tempo-abschnitte		Länge	Dauer
1	Neutrale Kondition	50	300 m	22 Sek.
2	Experimentelle Kondition/Minimal-kondition	30	300 m	36 Sek.
3	Neutrale Kondition	50	300 m	22 Sek
4	Experimentelle Kondition/Minimal-kondition	80	800 m	36 Sek
Total			1 700 m	116 Sek

Alle Studienteilnehmenden durchfahren die Sequenzen in der gleichen Reihenfolge. Eine Randomisierung der Sequenzen war aus technischen Gründen nicht möglich.

Die Wetterverhältnisse (leicht bewölkt, kein Niederschlag) und die Tageszeit (14 h im Frühjahr) werden in allen Parcours gleich gehalten, um mögliche Störeffekte so weit wie möglich auszuschliessen.

4.4.4 Stichprobe

Die Stichprobe für das VR-Fahrsimulatorexperiment umfasste insgesamt 61 Personen. Sieben Personen mussten von der Datenanalyse ausgeschlossen werden, da aufgrund technischer Fehler keine Daten aufgezeichnet wurden (n = 4) oder weil sie das Experiment wegen Unwohlsein abgebrochen haben (n = 3). Die finale Stichprobe umfasste somit 54 Personen. Tab. 40 zeigt die Verteilung der Stichprobe betreffend Geschlecht und Alter. In Tab. 41 wird die Stichprobe hinsichtlich der vorhandenen Fahrpraxis beschrieben.

In Experimenten können aufgrund der Kontrolle der Untersuchungssituation mit relativ kleinen Stichproben valide Erkenntnisse gewonnen werden.

Tab. 40 *Stichprobenstruktur hinsichtlich Demografie*

Merkmale	**Ausprägung**	**Anzahl Personen**
Total		*54*
Geschlecht	Männlich	28
	Weiblich	26
Alter	21–35 Jahre	26
	36–50 Jahre	19
	51–65 Jahre	9

Tab. 41 *Beschreibung Stichprobe hinsichtlich Fahrpraxis*

Merkmale	**n**	**Mittelwert**	**Standardabweichung**	**Minimum**	**Maximum**
Besitz Auto-Führerschein (in Jahren)	54	17.7	11.1	4	48
Anzahl zurückgelegte Kilometer im letzten Jahr	53	10 887	10 587	90	40 000
Nutzung Auto für Arbeit/Ausbildung[1]	54	3.1	1.7	1	5
Nutzung Auto zum Einkaufen[1]	54	2.9	1.2	1	5
Nutzung Auto für Freizeit[1]	54	2.9	1.1	1	5

[1] Häufigkeit der Nutzung wurde erhoben auf einer Skala von 1 = weniger als einmal pro Monat, 2 = monatlich, 3 = wöchentlich, 4 = mehrmals pro Woche, 5 = täglich

Für die Rekrutierung wurde einerseits das Marktforschungsinstitut TestingTime beauftragt und andererseits auch auf eigenen Kanälen rekrutiert (E-Mail-Listen von Studierenden, Social Media der Hochschule für Angewandte Psychologie FHNW, persönliches Umfeld).

Bedingungen für eine Teilnahme war der Besitz des Auto-Führerscheins seit mindestens drei Jahren und keine starke Anfälligkeit auf Reiseübelkeit. Die Anfälligkeit auf Simulator Sickness wurde mittels Screening-Fragebogen erhoben (siehe Tab. 42). Dieser basierte auf der Kurzversion des Motion Sickness Susceptibility Questionnaire (MSSQ-Short) nach Golding (2006). Der MSSQ-Short hat sich zur Identifikation von Personen, welche sich nicht für Studien mit einem Fahrsimulator eignen, bewährt. Für den Screening-Fragebogen wurde der MSSQ-Short auf sechs Items reduziert, um den Dropout von interessierten Personen möglichst gering zu halten. Dazu wurden die Items ausgewählt, welche in der Studie von Golding (2006) die grösste Korrelation mit der MSSQ-Short-Gesamtskala hatten. Personen, die mehr als zwei Ja-Antworten aufwiesen, wurden von einer Teilnahme ausgeschlossen. Drei Personen wurden «ausgescreent», weil sie eine der beiden Bedingungen nicht erfüllten.

Tab. 42 *Screening-Fragebogen zu Simulator Sickness*

Screening-Fragebogen (adaptiert von Golding, 2006)

Bitte denken Sie an die letzten 10 Jahre (ungefähr) zurück. Haben Sie sich während der Nutzung folgender Arten von Transportmitteln des Öfteren krank gefühlt oder Übelkeit verspürt?		
	Im Auto	*Ja / Nein*
	Im Bus / Reisebus	*Ja / Nein*
	Auf kleinen Booten	*Ja / Nein*
	Auf einem Schiff / einer Fähre	*Ja / Nein*
Bitte denken Sie an Ihre Kindheit (jünger als 12 Jahre) zurück. Haben Sie sich während der Nutzung folgender Arten von Unterhaltung des Öfteren krank gefühlt oder Übelkeit verspürt?		
	Auf einem Karussell auf Spielplätzen	*Ja / Nein*
	Auf einer Achterbahn / Kirmesbahn	*Ja / Nein*

4.4.5 Befragung

Nach der Fahrt durch den Parcours im VR-Fahrsimulator beantworten die Studienteilnehmenden Fragen zu den Streckenabschnitten sowie zu ihrer Person. Tab. 43 zeigt den Aufbau des Fragebogens. Der komplette Fragebogen ist in **Error! Reference source not found.** zu finden.

Tab. 43 *Aufbau Fragebogen*

Abschnitt	**Items**	**Quelle**
Streckenabschnitte mit experimenteller Kondition	Bevorzugte Geschwindigkeit, sichere Geschwindigkeit, wahrgenommenes Risiko, wahrgenommene Komplexität	
Momentanes Wohlbefinden (Kinetose)		Simulator Sickness Questionnaire SSQ (Kennedy et al., 1993)
Fahrerlebnis in VR	Immersion, Gefühl von Kontrolle	Presence Questionnaire (Kronqvist et al., 2016; Witmer & Singer, 1998)
Fahrstil	Geschwindigkeit, Ruhe, soziale Beeinflussbarkeit, Fokus, Planung, Regelverletzung	Driving Style Questionnaire (Chowdhury, 2014; French et al., 1993)
Einschätzung Fahrpraxis		Adaptiert von Safe Driving Performance (Victoir et al., 2005)
Fahrpraxis (objektiv)	Besitz Führerschein, Häufigkeit, gefahrene Kilometer, Verfügbarkeit Auto, Beteiligung an Verkehrsunfall	
Erfahrung VR/Gaming		
Soziodemografische Angaben	Alter, Geschlecht	

Mit Fragen zu den Streckenabschnitten mit einer experimentellen Kondition wird die Glaubwürdigkeit der Strassengestaltung untersucht. Unter anderem gelten die *Bevorzugte Geschwindigkeit* und die subjektive wahrgenommene *Sichere Geschwindigkeit* als Indikator für die Glaubwürdigkeit der Strassengestaltung beziehungsweise der Geschwindigkeitsangabe (Goldenbeld & van Schagen, 2007). Die Glaubwürdigkeit kann auch mit den Dimensionen des Sicherheitsempfindens (Wang et al., 2019) und der wahrgenommenen Komplexität (Charlton & Starkey, 2017) ergänzt werden. Das Sicherheitsempfinden wird mit den Dimensionen *sicher* (*safe)* und *unsicher* (*unsafe)* erhoben. Die Komplexität wird mit den

Dimensionen *einfach* (*easy*) und *schwierig* (*difficult*) abgebildet. Abb. 25 gibt exemplarisch für die Minimalkondition eine Übersicht der Items, mit denen die Wahrnehmung der Strassengestaltung erhoben wurde. Die Beurteilung erfolgt auf Basis eines Bildes des jeweiligen Streckenabschnittes mit den jeweiligen Gestaltungselementen. Ein Geschwindigkeitsschild ist nicht sichtbar.

Mit einem Fragebogen zum momentanen Wohlbefinden der Teilnehmenden werden Symptome von Kinetose (*Simulator Sickness*) erhoben. Insgesamt werden 16 Symptome abgefragt.

Fragen zur Immersion und zum Gefühl von Kontrolle (*feeling of control*) dienen dazu, die Stärke und Glaubwürdigkeit der Immersion in die VR-Umgebung zu erheben.

Der Fahrstil wird auf folgenden sechs Dimensionen erhoben: Geschwindigkeit (*speed*), Ruhe (*calmness*), soziale Beeinflussbarkeit (*social resistance*), Fokus (*focus*), Planung (*planning*), Regelverletzung (*deviance*) (Chowdhury, 2014; French et al., 1993).

Bei der Einschätzung der Fahrpraxis wird eine subjektive Einschätzung der eigenen Fähigkeiten zu sicherem und aufmerksamem Autofahren erhoben. Die Einschätzung erfolgt auf sieben Items. Mit Fragen zur Fahrpraxis werden zudem objektive Angaben zur Erfahrung und Häufigkeit der Autonutzung, zur Verfügbarkeit eines Autos sowie zur Beteiligung an einem Verkehrsunfall (unabhängig von der Verantwortlichkeit) erhoben.

Um bereits vorhandene Erfahrungen mit VR zu erheben, wird die Häufigkeit der Nutzung einer VR-Brille, eines VR-Fahrsimulators sowie das Fahren von Autorennen mit einer Gaming-Konsole erfasst.

Als demografische Variablen werden das Alter und Geschlecht erhoben.

Wie schnell würden Sie hier fahren? _____ *Km/h*

Welche Geschwindigkeitsbegrenzung würden Sie hier als sicher einstufen? _____ *Km/h*

Aus Ihrer Sicht als Autofahrer/in: Wie beurteilen Sie diesen Streckabschnitt?

Sicher	1	2	3	4	5	Unsicher
Einfach	1	2	3	4	5	Komplex

Abb. 25 *Items zu den Streckenabschnitten (hier: Minimalkondition)*

4.4.6 Messwerte und Auswertung

Im Rahmen des VR-Fahrsimulatorexperiments werden Variablen auf Basis von Messungen im Fahrsimulator sowie auf Basis der Befragung erhoben. Tab. 44 gibt eine Übersicht der Messwerte, die in der Auswertung verwendet werden.

Tab. 44 *Messwerte*

Variablen:	**Art der Erhebung:**	**Beschreibung der Variablen:**
Unabhängige Variablen	Experimentelle Konditionen	Tempo 30: 6 experimentelle Konditionen und 1 Minimalkondition Tempo 80: 4 experimentelle Konditionen und 1 Minimalkondition
Abhängige Variablen (1)	Messung im Fahrsimulator	Durchschnittlich gefahrene Geschwindigkeit pro Person
Abhängige Variablen (2)	Befragung	Jeweils pro experimentelle Kondition/Minimalkondition: bevorzugte Geschwindigkeit, sichere Geschwindigkeit, wahrgenommenes Risiko, wahrgenommene Komplexität

Die Geschwindigkeit im Fahrsimulator wurde kontinuierlich gemessen. Mit der Messung der Position auf der Strasse konnte die zurückgelegte Distanz ermittelt werden. Zusätzlich wurde jeder Streckenabschnitt (neutrale Kondition, Minimalkondition, experimentelle Kondition) mit einem individuellen Marker versehen. Somit konnte die durchschnittlich gefahrene Geschwindigkeit pro Person und Streckenabschnitt berechnet werden.

Für die Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeit in den experimentellen Konditionen wurde ein Streckenausschnitt verwendet, damit die Geschwindigkeitsanpassung zu Beginn und am Ende der Strecke nicht berücksichtigt wird. Um die kurzfristige Wirkung eines Gestaltungselements bei Tempo 30 zu untersuchen, wurde die Durchschnittsgeschwindigkeit im Fahrsimulator auf einem Streckenabschnitt von 50 m–100 m gemessen. Die kurzfristige Wirkung eines Gestaltungselements bei Tempo 80 wurde auf einem Streckenabschnitt von 250 m–500 m gemessen. Für die Messung der längerfristigen Wirkung eines Gestaltungselements wurde bei Tempo 30 ein Streckenabschnitt von 50 m–225 m gewählt. Für die Messung der längerfristigen Wirkung eines Gestaltungselements bei Tempo 80 wurde ein Streckenabschnitt von 250 m–750 m gewählt.

Die Geschwindigkeitsdaten werden mittels einem t-Test für verbundene Stichproben[2] ausgewertet. Dabei werden die durchschnittlichen Geschwindigkeiten in einer experimentellen Kondition mit der Minimalkondition verglichen. Damit lässt sich überprüfen, ob ein Gestaltungselement zu einer Veränderung der Geschwindigkeit im Vergleich zur Minimalkondition führt.

Zudem werden mittels Korrelationen Zusammenhänge zwischen der objektiven (im Fahrsimulator gefahrene Geschwindigkeit) und subjektiven Geschwindigkeit (bevorzugte und sichere Geschwindigkeit gemäss Befragung) und der Wahrnehmung des Risikos und der Komplexität überprüft.

4.5 Beschreibung des VR-Fahrsimulators

Die Weiterentwicklungen von Konsumenten-Hardware im Gaming- und Freizeitbereich der letzten Jahre begünstigen Eigenentwicklungen von realistischen Virtual-Reality-Erlebnissen. Jüngste Fortschritte bei Anbietern von VR-Brillen zeigen auf, dass Virtual Reality inzwischen kostengünstig und leistungsfähig genug geworden ist, um auch umfassende virtuelle Umgebungen performant und für eine Mehrheit der Bevölkerung angenehm darzustellen. Bei der Umsetzung des VR-Fahrsimulators wurde spezifisch auf zwei

[2] Dies bedeutet, dass die Daten aus wiederholten Messungen bestehen. Bei den vorliegenden Daten handelt es sich um wiederholte Messungen, da eine teilnehmende Person alle experimentellen Konditionen durchläuft.

Gesichtspunkte geachtet, welche sich gegenseitig beeinflussen. Um die Glaubwürdigkeit der virtuellen Welt sicherzustellen, wurden Gestaltungsgrundsätze entwickelt. So ist die Gestaltung der Häuser beispielsweise an schweizerische Strassenzüge angelehnt. Um der Leere und Repetition von Elementen entgegenzuwirken, wurden Gegenstände und Passanten sowie Gegenverkehr hinzugefügt. Dabei ist die Wiederverwendbarkeit von einzelnen Komponenten ein zentraler Faktor in zweierlei Hinsicht. Einerseits sollen die Treatments nicht mit zusätzlichen störenden Parametern beeinflusst werden, andererseits ist die Erstellung von neuen Inhalten sehr aufwändig, weshalb teilweise auf generische Assets von Drittanbietern zurückgegriffen wurde.

Virtual-Reality-Simulator

Die Einrichtung des VR-Fahrsimulators besteht aus mehreren Hard- und Software-Komponenten (vgl. Abbildung 26). Die Hardware umfasst dabei die folgenden Ein- und Ausgabegeräte und Instrumente:

- Hardware für die Human Computer Interaction (HCI) mit Force-Feedback-Lenkrad und -Pedalen, ohne Schaltung
  Thrustmaster T300 RS
- Hardware für die VR-Ausgabe mit integrierter Sensorik für die Messungen
  HTC Vive Pro Wireless HMD und Lighthouse-Stations
- Hardware für die VR-Simulation
  Desktop-PC mit High-End-Grafikkarte
- Darstellung der VR-Simulation über einen Kontrollbildschirm
- Autositz

***Abb. 26** Virtual Reality Setup für die Versuche in Olten*

Für die Software wurden diverse Software-Komponenten und Assets verwendet:

- Game Engine (Unreal Engine v4.25.4)
- Diverse Unreal-Plugins (Verkehrs- und Passantensimulation, Auto-Steuerung)
- Prozedural generierte Assets mit ArcGIS City Engine (Strassenabschnitte, Gebäude)
- Manuell erstellte Assets mit Blender (punktuelle Elemente, Terrain)
- Audio-Elemente sowie 3D-Modelle von Drittanbietern (Automobile, Avatare usw.)

Für die Simulation nicht vorgesehen sind Komponenten, welche die stereoskopische Blickrichtungsaufzeichnung durch Eye-Tracking ermöglichen. Im Versuch wird eine vereinfachte Methode für die Blickrichtungsaufzeichnung eingesetzt. Dazu werden Position und

Ausrichtung des Kopfes aufgezeichnet. Ebenfalls vom Experiment ausgenommen sind Komponenten, welche das Tracking von Handbewegungen und -posen für eine realistische Nachbildung in VR ermöglichen. Das haptische Feedback der Fahrsimulation wird über die integrierte Force-Feedback-Technologie des Lenkrads und Pedals erzeugt. Die dabei erzeugten Kräfte sollen ein realistisches Fahrgefühl hervorbringen. Durch Bewegungsplattformen werden in Fahrsimulatoren lebensechte Bewegungen und Vibrationen simuliert. Diese haptische Komponente wird im VR-Fahrsimulator nicht eingesetzt.

Fahrsimulator

Die VR-Fahrsimulation wird mit der *Unreal Engine* umgesetzt. Die weitverbreitete Game Engine zeichnet sich hauptsächlich durch die fotorealistischen Rendering-Eigenschaften aus, weshalb sie sich für den Einsatz besonders eignet.

Die VR-Fahrsimulation besteht hauptsächlich aus drei Teilen:

- Integration der 3D-Modelle (Strassenmodule und Umgebung)
- Interaktionsdesign für die Eingabe der Nutzerinnen und Nutzer mit automatisierter Schaltung
- Physiksimulation des Fahrzeugs und Simulation von Passanten und Gegenverkehr

Für die Simulation des Fahrzeugs wurde ein Plugin von einem Drittanbieter verwendet und es wurden die Parameter der physikalischen Eigenschaften des Autos bezüglich der Anforderungen des Simulators und des Fahrgefühls angepasst. Der Fahrzeuginnenraum wurde neutral gehalten und eine übliche Instrumentierung ausstaffiert. Das 3D-Modell wurde diesbezüglich so angepasst, damit relevante Informationen für die Testfahrten optimal sichtbar sind. Die Geräuschkulisse reagiert auf die Benutzereingabe sowie auf Beschleunigung und Bremsfaktoren.

Die Simulation von dynamischen Elementen wie Passanten und Hintergrundverkehr limitieren sich auf die gegnerische Spur, um eine Ablenkung des Fahrers zu reduzieren. Der Gegenverkehr befährt eine vordefinierte Strecke mit angemessenen Geschwindigkeiten und befolgt dabei keine Verkehrsregeln. Dies ist möglich, da in den Strassenabschnitten auf Kreuzungen mit Ampelverkehr, Kreuzverkehr und ähnliche Situationen verzichtet wurde. Das gleiche Prinzip wurde auch auf zu Fuss Gehende angewendet. Diese können sich auf der gegenüberliegenden Strassenseite bewegen oder in Gruppen stillstehen, interagieren jedoch nicht mit anderen Verkehrsteilnehmenden. Die Frequenz von Hintergrundverkehr und Passanten für die dynamische Umgebung wurde mit 10-15k Fahrzeugen pro Stunde für die Geschwindigkeit von 30 km/h festgelegt.

Die Modellierung der statischen Umgebungen gemäss Tempozonen und Gestaltungselementen wird im folgenden Abschnitt genauer beschrieben. Die Sequenzen wurden in einzelnen Szenen (Maps) angelegt. Bei der Durchfahrt im Simulator wird die jeweils nachfolgende Sequenz geladen.

3D-Modellierung

Für die Erstellung der 3D-Modelle wurde die bewährte Software *ArcGIS CityEngine von Esri* verwendet. Die *CityEngine* ist spezialisiert auf die prozedurale Erzeugung von detaillierten, performanten 3D-Stadtumgebungen. Der parametrische Modellieransatz erlaubt eine effiziente Umgestaltung der Strassenräume, ohne dass generische Gestaltungselemente manuell platziert werden müssen. Die generierten Strassen und Gebäude können als 3D-Modelle exportiert werden, die mit Spiel-Engines wie Unity oder Unreal kompatibel sind und dienen so als Grundlage für die virtuelle Welt.

Für die Gestaltung und Umsetzung der Strassenabschnitte wurden zwei unterschiedliche Regelwerke eingesetzt. Für die Gestaltung der Strassen und Markierungen wurden auf der Basis des Open-Source-Projekts «Complete Street Rule» von David Wassermann Anpassungen auf die Konditionen der Treatments erstellt (Wasserman, 2021). Als schnelles parametrisches Visualisierungstool für Strassen eignet sich dieses Regelset besonders gut

für die Erstellung von verschiedenen Entwurfsszenarien und zur Darstellung von Verkehrsplanungsmassnahmen.

Das Ziel der Gestaltung der Häuserzüge war es, eine realistische und nicht aufdringliche städtische Umgebung zu schaffen, welche keine signifikanten Ablenkungen wie Geschäfte oder öffentliche Plätze bietet. Dafür wurde für das Projekt das neue Regelwerk «Swiss Building Rules» erstellt (FHNW, 2021). Bei der 3D-Modellierung der Komponenten wurden typische Merkmale Schweizer Architektur in Agglomerationen untersucht und für sechs Gebäudetypen aufbereitet (vgl. Abb. 27).

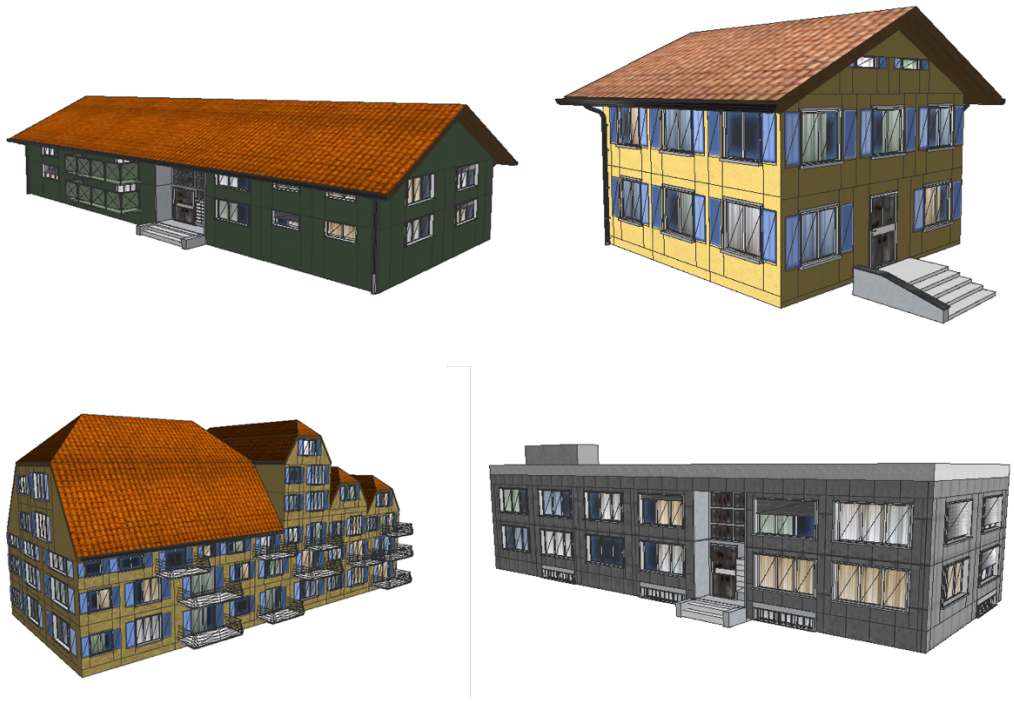


Abb. 27 *Auszug der exemplarischen Gebäudetypen aus dem «Swiss Building Rules»-Regelwerk*

Strukturelle und visuelle Informationen der Gebäudetypen wurden dabei mehrstufig aufgebaut, sodass sich unterschiedliche Geometrien Basisregeln teilen können (vgl. Abb. 28). Über diverse Attribute lassen sich Oberflächeninformationen von Fassaden und Dächern, Anzahl Stockwerke, Balkonvarianten sowie Fenster und Eingangsbereiche zu zahllosen Kombinationen variieren. Das Teilprojekt wurde dokumentiert und für künftige Nutzungen öffentlich zugänglich gemacht.

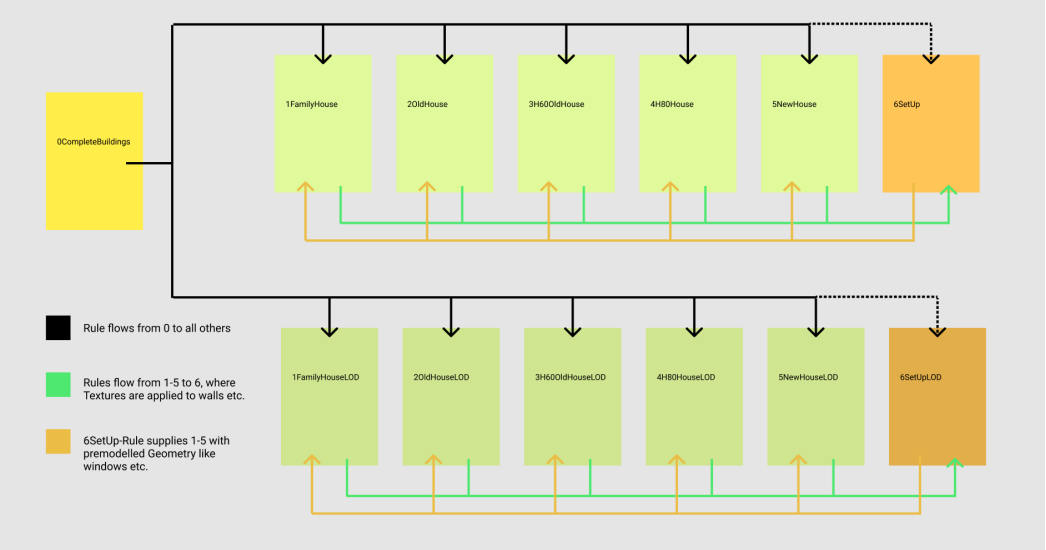


Abb. 28 *Schematische Darstellung des mehrstufigen Aufbaus des Regelwerks*

Die Strassenverläufe können in der *CityEngine* auf diverse Arten erstellt werden. Für die Treatments wurden Strassenzüge aufgrund von GIS-Daten aus der geografischen Datenbank *OpenStreetMap* (OSM) übernommen. Dieses Vorgehen hat sich aufgrund der nahtlosen Integration von OSM in *CityEngine* bewährt und im Vergleich zur Nutzung von CAD-Plänen als effizientere Methode herausgestellt.

Die 3D-Szenen werden über die integrierte Schnittstelle *Datasmith* der Unreal Engine direkt aus der *CityEngine* importiert. So können komplexe, vorkonstruierte Assets automatisiert und effizient integriert werden. Die Szenen werden mit manuell erstellten Modellen und Elementen ergänzt, die nicht effizient parametrisch generiert werden können. Durch die Ausstaffierung mit Elementen wie beispielsweise Automobile, Avatare, Texturen, Schilder und Geräusche können die Strassenzüge möglichst realitätsnah abgebildet werden.

Interaktionstreue

Die Verbesserung der Interaktionstreue (*Interaction-Fidelity)* für die Fahrsimulation war ein zentraler Faktor für die Überführung des Prototyps zum finalen Experiment. Um ein möglichst zeitnahes Feedback über die Bedienbarkeit und Interaktionstreue sowie die Richtigkeit der modellierten Strassenabschnitte zu bekommen, wurde eine zweite Installation aufgebaut. Die Software wurde in kurzen Zyklen entwickelt und durch den Continuous-Delivery-Ansatz automatisiert auf die verschiedenen Installationen freigegeben. So konnten die Prototypen häufig getestet werden.

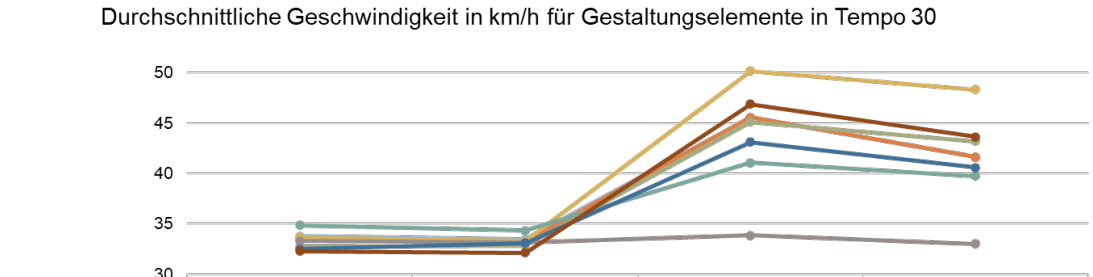
4.6 Resultate VR-Fahrsimulatorexperiment: Gestaltungselemente bei Tempo 30

In Strecken mit Tempo 30 wurde die Wirkung von sechs Gestaltungselementen untersucht. Abb. 29 zeigt die Ergebnisse für die kurzfristige (Geschwindigkeit auf der Strecke von 50 m bis 100 m) und langfristige Durchschnittsgeschwindigkeit im Fahrsimulator (Geschwindigkeit auf der Strecke von 50 m bis 225 m) sowie die Ergebnisse aus der Befragung zur Einschätzung der bevorzugten und sicheren Geschwindigkeit beurteilt auf Basis von Screenshots.

Es fällt auf, dass es einen grossen Unterschied zwischen der Geschwindigkeit im VR-Fahrsimulator und subjektiver Geschwindigkeit gibt. Dabei liegen die in der Befragung erhobenen Einschätzungen der Geschwindigkeit ein Stück über der im VR-Fahrsimulator gefahrenen Geschwindigkeit. Ausnahme bildet die Kondition der Parkplätze: Hier stimmen subjektiv richtige und objektiv gefahrene Geschwindigkeit überein. Die gefahrenen Geschwindigkeiten im VR-Fahrsimulator entsprechen ungefähr den im Feld gemessenen

Geschwindigkeiten. Zudem ist die bevorzugte Geschwindigkeit immer leicht höher als die als sicher eingestufte Geschwindigkeit.

Weiter zeigt die Darstellung, dass die Unterschiede in der gefahrenen Geschwindigkeit im VR-Fahrsimulator relativ klein sind.



	Durchschnittliche Geschwindigkeit 50 - 100m (Fahrsimulator)	Durchschnittliche Geschwindigkeit 50 - 225m (Fahrsimulator)	Bevorzugte Geschwindigkeit (Befragung)	Sichere Geschwindigkeit (Befragung)
MK1	33.79	33.45	45.57	41.64
MK2	33.44	33.25	45.57	41.64
EK1 Band	32.72	32.84	45.13	43.21
EK2 Velostreifen	33.66	33.29	50.19	48.32
EK3 MZS	34.84	34.35	41.08	39.74
EK4 Parkplatz	33.29	33.15	33.85	33.02
EK5 keine Leitlinie	32.49	33.08	43.11	40.57
EK6 Baum	32.28	32.14	46.89	43.62

***Abb. 29** Übersicht der Wirkung der Gestaltungselemente bei Tempo 30 auf Basis der Messung im Fahrsimulator und Befragung*

Nachfolgend werden die Resultate für die jeweiligen Gestaltungselemente auf Strecken mit Tempo 30 separat aufgeführt.

In Tab. 45 sind die Resultate für den Vergleich zwischen Minimalkondition 1 (in Sequenz 1) und Minimalkondition 2 (in Sequenz 8) dargestellt. Es gibt keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen der gefahrenen Geschwindigkeit in den beiden Minimalkonditionen.

Für alle weiteren Vergleiche zwischen Minimalkondition und experimenteller Kondition werden die Daten aus Minimalkondition 2 verwendet. Der Grund dafür ist, dass sich die Teilnehmenden in dieser Kondition an das Fahren im Fahrsimulator gewöhnt haben.

***Tab. 45** Vergleich von Minimalkondition 1 und Minimalkondition 2 bei Tempo 30*

		Minimalkondition 1			**Minimalkondition 2**		
Streckenabschnitt	**Erhebungsmethode**	Mittelwert	Standardabweichung	V85	Mittelwert	Standardabweichung	V85
50 m–100 m	Fahrsimulator	33.8	4.8	37.1	33.4$^{n.s.}$	3.4	36.8
50 m–225 m	Fahrsimulator	33.5	4.4	34.9	33.3$^{n.s.}$	2.5	35.7

Anmerkung: $^{n.s.}$ = statistisch nicht signifikant

Experimentelle Kondition 1 Breites Band

Tab. 46 zeigt die Resultate des Vergleichs der Minimalkondition 2 mit der experimentellen Kondition 1 (EK) Breites Band bei Tempo 30. Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen der gefahrenen Geschwindigkeit in der Minimalkondition und der EK1. Auch die bevorzugte Geschwindigkeit und die als sicher eingestufte Geschwindigkeit unterscheiden sich nicht signifikant zwischen der Minimalkondition und der EK1.

Tab. 46 *Vergleich von Minimalkondition und EK1 Breites Band bei Tempo 30*

		Minimalkondition 2			**EK1 Breites Band**		
Streckenabschnitt	**Erhebungsmethode**	Mittelwert	Standardabweichung	V85	Mittelwert	Standardabweichung	V85
50 m–100 m	Fahrsimulator	33.4	3.4	36.8	32.7$^{n.s.}$	3.4	36.2
50 m–225 m	Fahrsimulator	33.3	2.5	35.7	32.8$^{n.s.}$	2.6	35.3
Bevorzugte Geschwindigkeit	Befragung	45.3	8.3	-	45.1$^{n.s.}$	8.4	-
Sichere Geschwindigkeit	Befragung	41.4	9.8	-	43.3$^{n.s.}$	9.1	-

Anmerkung: $^{n.s.}$ = statistisch nicht signifikant

In Tab. 47 werden die Zusammenhänge zwischen der objektiven und subjektiven Geschwindigkeit und dem wahrgenommenen Risiko und der Komplexität des Streckenabschnitts dargestellt. Positive Zusammenhänge bedeuten: Je höher das wahrgenommene Risiko und die wahrgenommene Komplexität ist, desto höher ist die durchschnittlich gefahrene Geschwindigkeit bzw. die bevorzugte und als sicher wahrgenommene Geschwindigkeit. Negative Zusammenhänge bedeuten: Je höher das wahrgenommene Risiko und die wahrgenommene Komplexität ist, desto tiefer ist die gefahrene Geschwindigkeit bzw. die bevorzugte und als sicher wahrgenommene Geschwindigkeit.

Es gibt keinen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen dem wahrgenommenen Risiko bzw. der Komplexität von EK1 und der im Fahrsimulator gefahrenen Geschwindigkeit auf diesem Streckenabschnitt. Ein Zusammenhang zwischen der wahrgenommenen Komplexität und der bevorzugten Geschwindigkeit ist lediglich marginal signifikant[3]. Bei der Beurteilung der sicheren Geschwindigkeit gibt es einen signifikanten Zusammenhang zum wahrgenommenen Risiko: Je unsicherer die EK1 wahrgenommen wird, desto tiefer ist die Geschwindigkeit, die als sicher beurteilt wird.

Tab. 47 *Zusammenhänge zwischen objektiver/subjektiver Geschwindigkeit und wahrgenommenem Risiko/Komplexität der EK1 Breites Band bei Tempo 30*

Korrelationstabelle			
Streckenabschnitt	Erhebungsmethode	**Wahrgenommenes Risiko**	**Wahrgenommene Komplexität**
EK1 Breites Band 50 m–100 m	Fahrsimulator	-.07$^{n.s.}$	-.06$^{n.s.}$
EK1 Breites Band 50 m–225 m	Fahrsimulator	-.12$^{n.s.}$	-.19$^{n.s.}$
Bevorzugte Geschwindigkeit	Befragung	-.20$^{n.s.}$	-.24†
Sichere Geschwindigkeit	Befragung	-.32*	-.17$^{n.s.}$

Anmerkung: $^{n.s.}$ = statistisch nicht signifikant, † statistisch signifikant auf Niveau p < .1, * statistisch signifikant auf Niveau p < .05

Experimentelle Kondition 2 Radstreifen an der Fahrbahn

Tab. 48 zeigt die Resultate des Vergleichs der Minimalkondition 2 mit der EK2 Radstreifen an der Fahrbahn bei Tempo 30. Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen der gefahrenen Geschwindigkeit in der Minimalkondition und in der EK2. Jedoch gibt es Unterschiede in der Beurteilung der bevorzugten und der sicheren Geschwindigkeit, doch die

[3] In der wissenschaftlichen Berichterstattung werden Resultate ab einem Signifikanzlevel von p < .05 als statistisch signifikant erachtet. Resultate mit einem Signifikanzlevel von p < .1 werden als marginal signifikant beschrieben.

Effekte sind in umgekehrter Richtung als in den Annahmen formuliert: In der EK2 wird eine höhere Geschwindigkeit als in der Minimalkondition bevorzugt und als sicher beurteilt.

Tab. 48 *Vergleich von Minimalkondition und EK2 Radstreifen bei Tempo 30*

		Minimalkondition 2			**EK2 Radstreifen**		
Streckenabschnitt	**Erhebungsmethode**	Mittelwert	Standardabweichung	V85	Mittelwert	Standardabweichung	V85
50 m–100 m	Fahrsimulator	33.4	3.4	36.8	33.7$^{n.s.}$	3.2	36.5
50 m–225 m	Fahrsimulator	33.3	2.5	35.7	33.3$^{n.s.}$	2.5	35.3
Bevorzugte Geschwindigkeit	Befragung	45.3	8.3	-	50.2**	6.3	-
Sichere Geschwindigkeit	Befragung	41.4	9.8	-	48.4**	8.0	-

Anmerkung: $^{n.s.}$ = statistisch nicht signifikant, ** statistisch signifikant auf Niveau p < .01

Zwischen dem wahrgenommenen Risiko bzw. der Komplexität der EK2 mit Radstreifen und der im Fahrsimulator gefahrenen Geschwindigkeit gibt es keinen signifikanten Zusammenhang (siehe Tab. 49). Jedoch sind die Zusammenhänge zur bevorzugten und als sicher eingestuften Geschwindigkeit signifikant: Je unsicherer und komplexer dieser Streckenabschnitt wahrgenommen wird, desto tiefer ist die bevorzugte Geschwindigkeit und die als sicher eingestufte Geschwindigkeit.

Tab. 49 *Zusammenhänge zwischen objektiver/subjektiver Geschwindigkeit und wahrgenommenem Risiko/Komplexität der EK2 Radstreifen bei Tempo 30*

Korrelationstabelle			
Streckenabschnitt	Erhebungsmethode	**Wahrgenommenes Risiko**	**Wahrgenommene Komplexität**
EK2 Radstreifen 50 m–100 m	Fahrsimulator	-.1$^{n.s.}$	-.06$^{n.s.}$
EK2 Radstreifen 50 m–225 m	Fahrsimulator	.04$^{n.s.}$	.04$^{n.s.}$
Bevorzugte Geschwindigkeit	Befragung	-.46**	-.41**
Sichere Geschwindigkeit	Befragung	-.54**	-.38**

Anmerkung: $^{n.s.}$ = statistisch nicht signifikant, ** statistisch signifikant auf Niveau p < .01

Experimentelle Kondition 3 Mehrzweckstreifen

Tab. 50 zeigt die Resultate des Vergleichs der Minimalkondition 2 mit der experimentellen Kondition 3 (EK3) Mehrzweckstreifen bei Tempo 30. Der Unterschied zwischen der gefahrenen Geschwindigkeit in der Minimalkondition und in der EK3 ist nicht signifikant. Auch in Bezug auf die als sicher wahrgenommene Geschwindigkeit unterscheiden sich die beiden Konditionen nicht. Jedoch ist die bevorzugte Geschwindigkeit in EK3 tiefer als in der Minimalkondition.

Tab. 50 *Vergleich von Minimalkondition und EK3 Mehrzweckstreifen bei Tempo 30*

		Minimalkondition 2			**EK3 Mehrzweckstreifen**		
Streckenabschnitt	**Erhebungsmethode**	Mittelwert	Standardabweichung	V85	Mittelwert	Standardabweichung	V85
50 m–100 m	Fahrsimulator	33.4	3.4	36.8	34.8†	5.0	38.8
50 m–225 m	Fahrsimulator	33.3	2.5	35.7	34.4n.s.	5.0	37.5
Bevorzugte Geschwindigkeit	Befragung	45.3	8.3	-	41.2*	9.4	-
Sichere Geschwindigkeit	Befragung	41.4	9.8	-	39.9n.s.	9.6	-

Anmerkung: n.s. = statistisch nicht signifikant, † statistisch signifikant auf Niveau p < .1, * statistisch signifikant auf Niveau p < .05

Zwischen dem wahrgenommenen Risiko bzw. der Komplexität der EK3 mit Mehrzweckstreifen und der im Fahrsimulator gefahrenen Geschwindigkeit gibt es keinen signifikanten Zusammenhang (siehe Tab. 51). Auch in Bezug auf die bevorzugte Geschwindigkeit gibt es keine signifikanten Zusammenhänge. Der Zusammenhang zwischen dem wahrgenommenen Risiko und der sicheren Geschwindigkeit ist marginal signifikant: Je unsicherer die EK3 wahrgenommen wird, desto tiefer ist die als sicher eingestufte Geschwindigkeit.

Tab. 51 *Zusammenhänge zwischen objektiver/subjektiver Geschwindigkeit und wahrgenommenem Risiko/Komplexität der EK3 Mehrzweckstreifen bei Tempo 30*

Korrelationstabelle			
Streckenabschnitt	Erhebungsmethode	**Wahrgenommenes Risiko**	**Wahrgenommene Komplexität**
EK3 Mehrzweckstreifen 50 m–100 m	Fahrsimulator	-.02n.s.	-.09n.s.
EK3 Mehrzweckstreifen 50 m–225 m	Fahrsimulator	-.02n.s.	-.07n.s.
Bevorzugte Geschwindigkeit	Befragung	-.16n.s.	-.18n.s.
Sichere Geschwindigkeit	Befragung	-.23†	-.09n.s.

Anmerkung: n.s. = statistisch nicht signifikant, † statistisch signifikant auf Niveau p < .1

Experimentelle Kondition 4 Seitliche Parkplätze

Tab. 52 zeigt die Resultate des Vergleichs der Minimalkondition 2 mit der experimentellen Kondition 4 (EK4) Seitliche Parkplätze bei Tempo 30. Der Unterschied zwischen der gefahrenen Geschwindigkeit in der Minimalkondition und in der EK4 ist nicht signifikant. Jedoch wird in der EK4 eine tiefere Geschwindigkeit bevorzugt und als sicher beurteilt.

Tab. 52 *Vergleich von Minimalkondition und EK4 Seitliche Parkplätze bei Tempo 30*

		Minimalkondition 2			**EK4 Seitliche Parkplätze**		
Streckenabschnitt	**Erhebungsmethode**	Mittelwert	Standardabweichung	V85	Mittelwert	Standardabweichung	V85
50 m–100 m	Fahrsimulator	33.4	3.4	36.8	33.3n.s.	6.0	37.0
50 m–225 m	Fahrsimulator	33.3	2.5	35.7	33.2n.s.	4.8	36.0
Bevorzugte Geschwindigkeit	Befragung	45.3	8.3	-	34.1**	8.0	-
Sichere Geschwindigkeit	Befragung	41.4	9.8	-	33.3**	8.3	-

Anmerkung: n.s. = statistisch nicht signifikant, ** statistisch signifikant auf Niveau p < .01

Zwischen dem wahrgenommenen Risiko bzw. der Komplexität der EK4 mit seitlichen Parkplätzen und der im Fahrsimulator gefahrenen Geschwindigkeit gibt es keinen signifikanten Zusammenhang (Tab. 53). Jedoch sind die Zusammenhänge zur bevorzugten und zur sicheren Geschwindigkeit signifikant: Je höher das wahrgenommene Risiko und die Komplexität, desto tiefer liegt die bevorzugte Geschwindigkeit wie auch die als sicher empfundene Geschwindigkeit.

Tab. 53 *Zusammenhänge zwischen objektiver/subjektiver Geschwindigkeit und wahrgenommenem Risiko/Komplexität der EK4 Seitliche Parkplätze bei Tempo 30*

Korrelationstabelle			
Streckenabschnitt	Erhebungsmethode	**Wahrgenommenes Risiko**	**Wahrgenommene Komplexität**
EK4 Seitliche Parkplätze 50 m–100 m	Fahrsimulator	-.08$^{n.s.}$	-.09$^{n.s.}$
EK4 Seitliche Parkplätze 50 m–225 m	Fahrsimulator	-.07$^{n.s.}$	-.07$^{n.s.}$
Bevorzugte Geschwindigkeit	Befragung	-.40**	-.34**
Sichere Geschwindigkeit	Befragung	-.39**	-.39**

Anmerkung: $^{n.s.}$ = statistisch nicht signifikant, ** statistisch signifikant auf Niveau p < .01

Experimentelle Kondition 5 Keine Leitlinie

Tab. 54 zeigt die Resultate des Vergleichs der Minimalkondition 2 mit der experimentellen Kondition 5 (EK5) Keine Leitlinie bei Tempo 30. Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen der gefahrenen Geschwindigkeit in der Minimalkondition und in der EK5. Auch in Bezug auf die bevorzugte und sichere Geschwindigkeit unterscheiden sich die beiden Konditionen nicht.

Tab. 54 *Vergleich von Minimalkondition und EK5 Keine Leitlinie bei Tempo 30*

		Minimalkondition 2			**EK5 Keine Leitlinie**		
Streckenabschnitt	**Erhebungsmethode**	Mittelwert	Standardabweichung	V85	Mittelwert	Standardabweichung	V85
50 m–100 m	Fahrsimulator	33.4	3.4	36.8	32.5†	3.8	35.9
50 m–225 m	Fahrsimulator	33.3	2.5	35.7	33.1$^{n.s.}$	3.3	34.8
Bevorzugte Geschwindigkeit	Befragung	45.3	8.3	-	43.2$^{n.s.}$	9.5	-
Sichere Geschwindigkeit	Befragung	41.4	9.8	-	40.7$^{n.s.}$	10.3	-

Anmerkung: $^{n.s.}$ = statistisch nicht signifikant, † statistisch signifikant auf Niveau p < .1

Es gibt einen marginal signifikanten Zusammenhang zwischen dem wahrgenommenen Risiko der EK5 und der gefahrenen Geschwindigkeit (siehe Tab. 55): Je unsicherer dieser Streckenabschnitt wahrgenommen wird, desto tiefer ist die gefahrene Geschwindigkeit im Fahrsimulator. Die weiteren Zusammenhänge sind alle signifikant: Je unsicherer und komplexer die EK5 wahrgenommen wird, desto tiefer ist die bevorzugte wie auch die als sicher empfundene Geschwindigkeit.

Tab. 55 *Zusammenhänge zwischen objektiver/subjektiver Geschwindigkeit und wahrgenommenem Risiko/Komplexität der EK5 Keine Leitlinie bei Tempo 30*

Korrelationstabelle			
Streckenabschnitt	Erhebungsmethode	**Wahrgenommenes Risiko**	**Wahrgenommene Komplexität**
EK5 Keine Leitlinie 50 m–100 m	Fahrsimulator	-.28*	-.18$^{n.s.}$
EK5 Keine Leitlinie 50 m–225 m	Fahrsimulator	-.25†	-.20$^{n.s.}$
Bevorzugte Geschwindigkeit	Befragung	-.53**	-.45**
Sichere Geschwindigkeit	Befragung	-.55**	-.31*

Anmerkung: $^{n.s.}$ = statistisch nicht signifikant, † statistisch signifikant auf Niveau p < .1, * statistisch signifikant auf Niveau p < .05, ** statistisch signifikant auf Niveau p < .01

Experimentelle Kondition 6 Bäume und Sitzbänke auf dem Trottoir

Tab. 56 zeigt die Resultate des Vergleichs der Minimalkondition 2 mit der experimentellen Kondition 6 (EK6) Bäume und Sitzbänke auf dem Trottoir bei Tempo 30. Die gefahrene Geschwindigkeit in EK6 ist signifikant tiefer als in der Minimalkondition. Jedoch unterscheiden sich die beiden Konditionen nicht in Bezug auf die bevorzugte und sichere Geschwindigkeit.

Tab. 56 *Vergleich von Minimalkondition und EK6 Bäume und Sitzbänke bei Tempo 30*

		Minimalkondition 2			**EK6 Bäume und Sitzbänke**		
Streckenabschnitt	**Erhebungsmethode**	Mittelwert	Standardabweichung	V85	Mittelwert	Standardabweichung	V85
50 m–100 m	Fahrsimulator	33.4	3.4	36.8	32.3*	2.8	35.5
50 m–225 m	Fahrsimulator	33.3	2.5	35.7	32.1**	2.0	34.2
Bevorzugte Geschwindigkeit	Befragung	45.3	8.3	-	46.6$^{n.s.}$	7.6	-
Sichere Geschwindigkeit	Befragung	41.4	9.8	-	43.4$^{n.s.}$	9.6	-

Anmerkung: $^{n.s.}$ = statistisch nicht signifikant, * statistisch signifikant auf Niveau p < .05, ** statistisch signifikant auf Niveau p < .01

Es gibt keinen signifikanten Zusammenhang zwischen dem wahrgenommenen Risiko bzw. der Komplexität der EK6 mit Bäumen und Sitzbänken und der im Fahrsimulator gefahrenen Geschwindigkeit (Tab. 57). Alle weiteren Zusammenhänge sind jedoch signifikant: Je unsicherer und komplexer dieser Streckenabschnitt wahrgenommen wird, desto tiefer ist die bevorzugte wie auch die als sicher empfundene Geschwindigkeit.

Tab. 57 *Zusammenhänge zwischen objektiver/subjektiver Geschwindigkeit und wahrgenommenem Risiko/Komplexität der EK6 Bäume und Sitzbänke in Tempo 30*

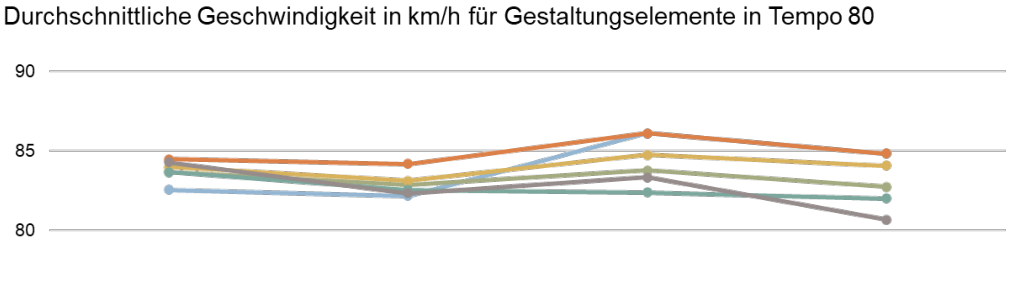
Korrelationstabelle			
Streckenabschnitt	Erhebungsmethode	**Wahrgenommenes Risiko**	**Wahrgenommene Komplexität**
EK6 Bäume und Sitzbänke 50 m–100 m	Fahrsimulator	-.15$^{n.s.}$	-.10$^{n.s.}$
EK6 Bäume und Sitzbänke 50 m–225 m	Fahrsimulator	.10$^{n.s.}$	-.05$^{n.s.}$
Bevorzugte Geschwindigkeit	Befragung	-.35**	-.45**
Sichere Geschwindigkeit	Befragung	-.52**	-.36**

Anmerkung: $^{n.s.}$ = statistisch nicht signifikant, † statistisch signifikant auf Niveau p < .1, * statistisch signifikant auf Niveau p < .05, ** statistisch signifikant auf Niveau p < .01

4.7 Resultate VR-Fahrsimulatorexperiment: Gestaltungselemente bei Tempo 80

Auf Strecken mit Tempo 80 wurde die Wirkung von vier Gestaltungselementen untersucht. Abb. 30 zeigt die Ergebnisse für die kurzfristige und langfristige Durchschnittsgeschwindigkeit im Fahrsimulator sowie die Ergebnisse aus der Befragung zur Einschätzung der bevorzugten und sicheren Geschwindigkeit.

Die Darstellung zeigt, dass die Unterschiede zwischen den verschiedenen Konditionen (wenn überhaupt vorhanden) relativ gering sind. Die in der Befragung erhobenen Geschwindigkeiten sind grundsätzlich ähnlich wie die im VR-Fahrsimulator gefahrenen Geschwindigkeiten. Wie auch bei den Geschwindigkeiten bei Tempo 30 fällt auf, dass die bevorzugte Geschwindigkeit immer leicht höher ist als die als sicher eingestufte Geschwindigkeit.



	Durchschnittliche Geschwindigkeit 250 - 500m (Fahrsimulator)	Durchschnittliche Geschwindigkeit 250 - 750m (Fahrsimulator)	Bevorzugte Geschwindigkeit (Befragung)	Sichere Geschwindigkeit (Befragung)
MK1	82.55	82.18	86.13	84.83
MK2	84.48	84.18	86.13	84.83
EK1	83.7	82.88	83.77	82.75
EK2	84	83.11	84.75	84.08
EK3	83.67	82.55	82.4	82
EK4	84.28	82.33	83.34	80.68

Abb. 30 *Übersicht der Wirkung der Gestaltungselemente bei Tempo 80 aufgrund Messung im Fahrsimulator und Befragung*

Nachfolgend werden die Resultate für die jeweiligen Gestaltungselemente auf Strecken mit Tempo 80 (T80) separat aufgeführt.

In Tab. 58 sind die Resultate für den Vergleich zwischen Minimalkondition 1 (in Sequenz 1) und Minimalkondition 2 (in Sequenz 8) dargestellt. In der Minimalkondition 2 ist die

gefahrene Geschwindigkeit höher als in Minimalkondition 1. Dies wird dadurch erklärt, dass sich die Teilnehmenden in der letzten Sequenz an das Fahren im Fahrsimulator gewöhnt haben. Aus diesem Grund werden für die weiteren Vergleiche zwischen Minimalkondition und experimenteller Kondition die Daten aus Minimalkondition 2 verwendet.

Tab. 58 *Vergleich von Minimalkondition 1 und Minimalkondition 2 bei Tempo 80*

		Minimalkondition 1			**Minimalkondition 2**		
Streckenabschnitt	**Erhebungsmethode**	Mittelwert	Standardabweichung	V85	Mittelwert	Standardabweichung	V85
250 m–500 m	Fahrsimulator	82.6	6.5	87.1	84.5*	7.6	87.8
250 m–750 m	Fahrsimulator	82.2	6.3	85.5	84.2*	7.9	86.5

Anmerkung: * statistisch signifikant auf Niveau p < .05

Experimentelle Kondition 1 Breites Band

In Tab. 59 werden die Ergebnisse des Vergleichs der Minimalkondition 2 mit der experimentellen Kondition 1 (EK1) Breites Band bei Tempo 80 dargestellt. Die im Fahrsimulator gefahrene Geschwindigkeit als auch die bevorzugte und sichere Geschwindigkeit gemäss Befragung sind signifikant tiefer in der EK1 als in der Minimalkondition.

Tab. 59 *Vergleich von Minimalkondition und EK1 Breites Band bei Tempo 80*

		Minimalkondition 2			**EK1 Breites Band**		
Streckenabschnitt	**Erhebungsmethode**	Mittelwert	Standardabweichung	V85	Mittelwert	Standardabweichung	V85
250 m–500 m	Fahrsimulator	84.5	7.6	87.8	83.7$^{n.s.}$	7.6	87.6
250 m–750 m	Fahrsimulator	84.2	7.9	86.5	82.9*	6.5	87.0
Bevorzugte Geschwindigkeit	Befragung	86.0	8.9	-	83.7*	8.9	-
Sichere Geschwindigkeit	Befragung	84.7	8.2	-	82.7*	9.0	-

Anmerkung. $^{n.s.}$ = statistisch nicht signifikant, * statistisch signifikant auf Niveau p < .05

Es gibt keinen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Risiko bzw. der Komplexität der EK1 und der gefahrenen Geschwindigkeit (Tab. 60). Es gibt lediglich marginal signifikante Zusammenhänge zwischen der wahrgenommenen Komplexität des Streckenabschnitts und der bevorzugten und sicheren Geschwindigkeit: Je komplexer der Streckenabschnitt wahrgenommen wird, desto tiefer liegt die bevorzugte und die als sicher empfundene Geschwindigkeit.

Tab. 60 *Zusammenhänge zwischen objektiver/subjektiver Geschwindigkeit und wahrgenommenem Risiko/Komplexität der EK1 Breites Band bei Tempo 80*

Korrelationstabelle			
Streckenabschnitt	Erhebungsmethode	**Wahrgenommenes Risiko**	**Wahrgenommene Komplexität**
EK1 Breites Band 250 m–500 m	Fahrsimulator	.00$^{n.s.}$	-.03$^{n.s.}$
EK1 Breites Band 250 m–750 m	Fahrsimulator	.07$^{n.s.}$	-.01$^{n.s.}$
Bevorzugte Geschwindigkeit	Befragung	-.14$^{n.s.}$	-.24†
Sichere Geschwindigkeit	Befragung	-.05$^{n.s.}$	-.25†

Anmerkung: $^{n.s.}$ = statistisch nicht signifikant, † statistisch signifikant auf Niveau p < .1

Experimentelle Kondition 2 Breites Band mit Muster

In Tab. 61 werden die Ergebnisse des Vergleichs der Minimalkondition 2 mit der experimentellen Kondition 2 (EK2) Breites Band mit Muster bei Tempo 80 dargestellt. Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen der gefahrenen Geschwindigkeit in der Minimalkondition und in der EK2. Jedoch wird in der EK2 eine tiefere Geschwindigkeit bevorzugt als in der Minimalkondition.

***Tab. 61** Vergleich von Minimalkondition und EK2 Breites Band mit Muster bei Tempo 80*

		Minimalkondition 2			**EK2 Breites Band mit Muster**		
Streckenabschnitt	**Erhebungsmethode**	Mittelwert	Standardabweichung	V85	Mittelwert	Standardabweichung	V85
250 m–500 m	Fahrsimulator	84.5	7.6	87.8	84.0$^{n.s.}$	6.1	87.5
250 m–750 m	Fahrsimulator	84.2	7.9	86.5	83.1$^{n.s.}$	6.1	85.8
Bevorzugte Geschwindigkeit	Befragung	86.0	8.9	-	84.7*	8.5	-
Sichere Geschwindigkeit	Befragung	84.7	8.2	-	84.0$^{n.s.}$	9.0	-

Anmerkung: $^{n.s.}$ = statistisch nicht signifikant, * statistisch signifikant auf Niveau $p < .05$

Lediglich der Zusammenhang zwischen der wahrgenommenen Komplexität der EK2 und der bevorzugten Geschwindigkeit ist marginal signifikant (Tab. 62). Je höher die wahrgenommene Komplexität dieses Streckenabschnitts, desto tiefer ist die bevorzugte Geschwindigkeit.

***Tab. 62** Zusammenhänge zwischen objektiver/subjektiver Geschwindigkeit und wahrgenommenem Risiko/Komplexität der EK2 Breites Band mit Muster bei Tempo 80*

Korrelationstabelle			
Streckenabschnitt	Erhebungsmethode	**Wahrgenommenes Risiko**	**Wahrgenommene Komplexität**
EK2 Breites Band mit Muster 250 m–500 m	Fahrsimulator	-.08$^{n.s.}$	-.17$^{n.s.}$
EK2 Breites Band mit Muster 250 m–750 m	Fahrsimulator	-.08$^{n.s.}$	-.10$^{n.s.}$
Bevorzugte Geschwindigkeit	Befragung	-.07$^{n.s.}$	-.22†
Sichere Geschwindigkeit	Befragung	.01$^{n.s.}$	-.04$^{n.s.}$

Anmerkung: $^{n.s.}$ = statistisch nicht signifikant, † statistisch signifikant auf Niveau $p < .1$

Experimentelle Kondition 3 Breites Band mit Muster und breite Mittellinie mit Muster

In Tab. 63 werden die Ergebnisse des Vergleichs der Minimalkondition 2 mit der experimentellen Kondition 3 (EK3) Breites Band mit Muster und Breite Mittellinie mit Muster bei Tempo 80 dargestellt. Die gefahrene Geschwindigkeit in der EK3 ist marginal signifikant tiefer als in der Minimalkondition. Die bevorzugte Geschwindigkeit und die sichere Geschwindigkeit sind beide signifikant tiefer in der EK3 als in der Minimalkondition.

Tab. 63 *Vergleich von Minimalkondition und EK3 Breites Band mit Muster und Breite Mittellinie mit Muster bei Tempo 80*

		Minimalkondition 2			**EK3 Breites Band mit Muster und Breite Mittellinie mit Muster**		
Streckenabschnitt	**Erhebungsmethode**	Mittelwert	Standardabweichung	V85	Mittelwert	Standardabweichung	V85
250 m–500 m	Fahrsimulator	84.5	7.6	87.8	83.7$^{n.s.}$	6.6	86.9
250 m–750 m	Fahrsimulator	84.2	7.9	86.5	82.6†	5.0	85.3
Bevorzugte Geschwindigkeit	Befragung	86.0	8.9	-	82.4**	9.8	-
Sichere Geschwindigkeit	Befragung	84.7	8.2	-	82.0*	8.9	-

Anmerkung: $^{n.s.}$ = statistisch nicht signifikant, † statistisch signifikant auf Niveau p < .1, * statistisch signifikant auf Niveau p < .05, ** statistisch signifikant auf Niveau p < .01

Die Zusammenhänge zwischen dem wahrgenommenen Risiko und der Komplexität der EK3 und der gefahrenen Geschwindigkeit sind nicht signifikant (Tab. 64). Es gibt jedoch einen negativen Zusammenhang zwischen Risiko und der bevorzugten Geschwindigkeit. Zudem gibt es negative Zusammenhänge zwischen Komplexität und der bevorzugten und sicheren Geschwindigkeit: Je komplexer die EK3 wahrgenommen wird, desto tiefer liegt die bevorzugte als auch die sichere Geschwindigkeit.

Tab. 64 *Zusammenhänge zwischen objektiver/subjektiver Geschwindigkeit und wahrgenommenem Risiko/Komplexität der EK3 Breites Band mit Muster und Breite Mittellinie mit Muster bei Tempo 80*

Korrelationstabelle			
Streckenabschnitt	Erhebungsmethode	**Wahrgenommenes Risiko**	**Wahrgenommene Komplexität**
EK3 Breites Band mit Muster und Breite Mittellinie mit Muster 250 m–500 m	Fahrsimulator	.25†	.01$^{n.s.}$
EK3 Breites Band mit Muster und Breite Mittellinie mit Muster 250 m–750 m	Fahrsimulator	.21$^{n.s.}$	.02$^{n.s.}$
Bevorzugte Geschwindigkeit	Befragung	-.34**	-.40**
Sichere Geschwindigkeit	Befragung	-.16$^{n.s.}$	-.29*

Anmerkung: $^{n.s.}$ = statistisch nicht signifikant, † statistisch signifikant auf Niveau p < .1, * statistisch signifikant auf Niveau p < .05, ** statistisch signifikant auf Niveau p < .01

Experimentelle Kondition 4 Keine Leitlinie

In Tab. 65 werden die Ergebnisse des Vergleichs der Minimalkondition 2 mit der experimentellen Kondition 4 (EK4) Keine Leitlinie bei Tempo 80 dargestellt. Die gefahrene Geschwindigkeit sowie die bevorzugte und sichere Geschwindigkeit sind tiefer in der EK4 als in der Minimalkondition.

Tab. 65 *Vergleich von Minimalkondition und EK4 Keine Leitlinie bei Tempo 80*

		Minimalkondition 2			**EK4 Keine Leitlinie**		
Streckenabschnitt	**Erhebungsmethode**	Mittelwert	Standardabweichung	V85	Mittelwert	Standardabweichung	V85
250 m–500 m	Fahrsimulator	84.5	7.6	87.8	84.3$^{n.s.}$	6.8	90.9
250 m–750 m	Fahrsimulator	84.2	7.9	86.5	82.3*	5.9	85.4
Bevorzugte Geschwindigkeit	Befragung	86.0	8.9	-	83.1**	10.9	-
Sichere Geschwindigkeit	Befragung	84.7	8.2	-	80.7**	9.0	-

Anmerkung: $^{n.s.}$ = statistisch nicht signifikant, * statistisch signifikant auf Niveau p < .05, ** statistisch signifikant auf Niveau p < .01

Es gibt keine signifikanten Zusammenhänge zwischen dem wahrgenommenen Risiko bzw. der Komplexität der EK4 und der im Fahrsimulator gefahrenen Geschwindigkeit (Tab. 66). Alle weiteren Zusammenhänge sind signifikant oder marginal signifikant.

Tab. 66 *Zusammenhänge zwischen objektiver/subjektiver Geschwindigkeit und wahrgenommenem Risiko/Komplexität der EK4 Keine Leitlinie bei Tempo 80*

Korrelationstabelle			
Streckenabschnitt	Erhebungsmethode	**Wahrgenommenes Risiko**	**Wahrgenommene Komplexität**
EK4 Keine Leitlinie 250 m–500m	Fahrsimulator	-.20$^{n.s.}$	-.27*
EK4 Keine Leitlinie 250 m–750 m	Fahrsimulator	-.13$^{n.s.}$	-.19$^{n.s.}$
Bevorzugte Geschwindigkeit	Befragung	-.24†	-.30*
Sichere Geschwindigkeit	Befragung	-.42**	-.48**

Anmerkung: $^{n.s.}$ = statistisch nicht signifikant, † statistisch signifikant auf Niveau p < .1, * statistisch signifikant auf Niveau p < .05, ** statistisch signifikant auf Niveau p <.01

4.8 Fazit

Insgesamt zeigen die Ergebnisse des VR-Fahrsimulatorexperiments ein gemischtes Bild. Sowohl bei Tempo 30 als auch bei Tempo 80 zeigt sich eine geringe Wirkung von einzelnen Gestaltungselementen auf die gefahrene Geschwindigkeit. Dies führt zum Rückschluss, dass mit Gestaltungselementen allein eine geringe Wirkung erzielt werden kann. Unter Berücksichtigung des exponentiellen Zusammenhangs zwischen Geschwindigkeit und Unfallschwere kommen aber auch kleinen Geschwindigkeitsreduktionen von 3 Prozent bedeutsamere Auswirkungen in Bezug auf die Reduktion der Unfallschwere zu (Niemann, 2020).

Bei Tempo 30 zeigt sich, dass die Gestaltungselemente «breites Band» und «keine Leitlinie» weder in der objektiv gefahrenen Geschwindigkeit noch in der subjektiven Wahrnehmung eine Wirkung zeigen. Eine statistisch relevante Wirkung zeigt sich nur in Bezug auf den Grünraum (Kondition Bäume und Bänke). Die gemessene objektive Geschwindigkeitsreduktion zeigt sich aber nicht in der subjektiven Wahrnehmung: Subjektiv wird hier keine geringere Geschwindigkeit gewählt und als sicherer eingestuft im Vergleich zur Minimalkondition.

Bemerkenswert ist für die Tempo-30-Strecke, dass mit Ausnahme der Parkplätze keine der Gestaltungselemente dazu führen, dass eine Mehrheit der Teilnehmenden die Strecke als eine Tempo-30-Strecke wahrnehmen. Diese Elemente sind demzufolge vermutlich subjektiv nicht selbsterklärend. Die starke subjektive Wirkung von Parkplätzen zeigt, dass diese klar zu einer Einordung der Strasse als Tempo-30-Strasse führen.

Bei Tempo 80 sind die Ergebnisse klarer. Hier zeigen alle verwendeten Gestaltungselemente eine Wirkung in Richtung einer Geschwindigkeitsreduktion. Diese Wirkung zeigt sich sowohl bei der gefahrenen Geschwindigkeit als auch bei der subjektiv gewählten Geschwindigkeit.

Die Wirkung der einzelnen Elemente wird im Detail im Synthesekapitel in Verbindung mit den Ergebnissen aus den Messungen im Feld diskutiert.

5 Synthese der Ergebnisse und Handlungsempfehlungen

Der Einfluss von Gestaltungselementen auf die gefahrene Geschwindigkeit wurde auf Basis von drei Arbeitsschritten untersucht: Im ersten Schritt wurde mittels einer Literaturrecherche der Stand der nationalen und internationalen Literatur zusammengefasst. Im zweiten Schritt wurde der Einfluss von Gestaltungselementen auf Basis von bestehenden und neuen Messungen im Feld analysiert. Dabei wurden die Daten von mehr als 260 Messungen einbezogen. Abschliessend wurde mittels einer VR-Fahrsimulatorstudie mit 54 Probanden die Wirkung von zehn Gestaltungselementen auf die gefahrene Geschwindigkeit erhoben.

Die Ergebnisse aus den Arbeitspaketen zur Wirkung von Gestaltungselementen auf die gefahrene Geschwindigkeit zeigen ein diverses Bild: Insgesamt zeigen in den vorliegenden Analysen nur ausgewählte Gestaltungselemente eine statistisch nachweisbare Wirkung auf die gefahrene Geschwindigkeit. Einzelne Gestaltungselemente zeigen in der VR-Fahrsimulatorstudie eine Reduktion der Geschwindigkeit um 3.5 Prozent.

Nachfolgend werden die Ergebnisse aus den verschiedenen Arbeitspaketen zusammengetragen und im Hinblick auf Empfehlungen für die Gestaltung von Strassen diskutiert. Die Diskussion erfolgt entlang der Geschwindigkeitsregimes. Tab. 67 zeigt die Datenbasis für die jeweiligen Geschwindigkeitsregimes respektive Strassentypen im Überblick.

Tab. 67 *Datengrundlage aus den verschiedenen Arbeitspaketen*

Geschwindigkeitsregime/Strassentyp	**VM**	**MF**	**VR-E**
Begegnungszone, wohnorientiert	**X**		
Tempo 30	**X***		**X****
Tempo 50	**X**	**X**	
Tempo 80			**X**

Anmerkung VM = vorhandene Messungen, MF = Messungen im Feld, VR-E = Fahrsimulatorexperiment, * = gemessen in Tempo-30-Zonen und Hauptverkehrsstrassen mit signalisierter Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h, ** = Hauptverkehrsstrasse innerorts

5.1 Wirkung der Gestaltungselemente innerorts

5.1.1 Wirkung der Gestaltungselemente in Begegnungszonen

Die durchschnittlich gemessene Geschwindigkeit v_{85} in Begegnungszonen liegt gemäss den Geschwindigkeitsmessungen bei 27.1 km/h. In Bezug auf die Messungen in Begegnungszonen ist darauf hinzuweisen, dass dies immer Strassen mit Parkplätzen waren.

In Tab. 68 sind die Ergebnisse aus den Messungen dargestellt. In Begegnungszonen zeigt nur die Fahrstreifenbreite eine statistisch relevante Wirkung auf die gefahrene Geschwindigkeit. Ab Fahrstreifenbreiten unter vier Metern zeigt sich eine Verringerung der Geschwindigkeit. Dieser Einfluss war bei Einbahnstrassen nicht signifikant.

Grundsätzlich geben die Ergebnisse Hinweise darauf, dass für die Begegnungszone die untersuchten einzelnen Gestaltungselemente keine oder wenig Wirkung zeigen und für diesen Strassentyp andere und umfassendere Massnahmen entwickelt werden müssen. Aufgrund seiner besonderen Charakteristik empfiehlt es sich, spezifische Massnahmen zu entwickeln und deren Wirksamkeit gesamtheitlich zu untersuchen.

***Tab. 68** Wirkung der Gestaltungselemente für Tempo 20*

Gestaltungs-element	Psychologische Prozesse	Messung	Fazit Wirkung
Gegenverkehr	Verringerung der subjektiven Gefahr/des Risikos	K	Keine Wirkung gemessen
Radstreifen an der Fahrbahn	Entweder: Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden, Verletzung der Velofahrenden) Oder: Verringerung der subjektiven Gefahr/des Risikos	-	-
Mehrzweck-streifen	Verringerung der subjektiven Gefahr/des Risikos		-
Seitliche Park-plätze	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der anderen Fahrenden) (Elliott et al., 2003)	-	-
Keine Leitlinie	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden) (Elliott et al., 2003)	-	-
Bäume und Sitzbänke auf dem Trottoir	Erhöhung der zu verarbeitenden Informationen führt zu einer Erhöhung der Aufmerksamkeit und Reduktion der Geschwindigkeit	-	-
Horizontaler Versatz	Erhöhung der Komplexität führt zu einer Erhöhung der Aufmerksamkeit und Reduktion der Geschwindigkeit; objektives Hindernis in der Fahrbahn	K	Keine Wirkung gemessen
Mittelinsel		-	
Fussgänger-überquerungen	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Verletzung der Fahrenden) (Elliott et al., 2003)	-	
Schild	Information	-	
Fahrstreifen-breite	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos bei geringerer Fahrstreifenbreite (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden) (Elliott et al., 2003)	E (nur Einbahn)	Erhöhung der gemessenen Geschwindigkeit (bei Verbreiterung)

Anmerkungen: K = Kein Unterschied zur Vergleichsstrecke, E = Signifikante Erhöhung der Geschwindigkeit in Bezug auf die Vergleichsstrecke

5.1.2 Wirkung der Gestaltungselemente bei Tempo 30

Die durchschnittlich gemessene Geschwindigkeit v_{85} in Tempo-30-Strassen liegt über den Geschwindigkeitslimiten. Ähnlich wie in der Begegnungszone wird schneller gefahren als es das Geschwindigkeitslimit vorgibt. Bei den Messungen liegt die durchschnittliche Geschwindigkeit der gemessenen v_{85} bei 34.3 km/h; im VR-Fahrsimulatorexperiment liegt die durchschnittliche Geschwindigkeit bei 33.2 km/h. Die Wirkung der Gestaltungselemente bei Tempo 30 muss, wie weiter unten erläutert, differenziert betrachtet werden. Darum wird die Wirkung der einzelnen Gestaltungselemente hier entlang der einzelnen Elemente diskutiert. Tab. 69 gibt einen Überblick über die Ergebnisse.

Wirkung des breiten Bandes

Auf Basis der VR-Experimente kann keine Wirkung des breiten Bandes nachgewiesen werden. Eine visuelle Verengung zeigt weder bei der gefahrenen Geschwindigkeit noch bei der subjektiven Wahrnehmung eine Wirkung. Auf Basis der Ergebnisse des VR-Fahrsimulatorexperiments kann der Einsatz von breiten Bändern nicht zur Geschwindigkeitsreduktion auf Tempo-30-Strecken empfohlen werden.

Wirkung von Radstreifen

Radstreifen zeigen weder in den Messungen im Feld noch im VR-Experiment eine Wirkung auf die Geschwindigkeitswahl. Bei Radstreifen gilt zu berücksichtigen, dass deren Wirkungsweise auf zwei Mechanismen beruhen kann, welche eine konträre Wirkung zeigen und sich somit neutralisieren könnten:

- Radstreifen können einerseits mit einer Verbreiterung der Fahrbahn verbunden sein, welche wiederum zu einer Geschwindigkeitserhöhung führt. Weiter sind Radstreifen wie sie in der Studie eingesetzt wurden auf Schweizer Strassen in der Regel auf Tempo-50-Strecken anzutreffen, was ebenfalls zu einer höheren Geschwindigkeitserwartung führen könnte.
- Andererseits führt die Anwesenheit von Velofahrenden als vulnerable Verkehrsteilnehmende zu einer höheren Wahrnehmung des Risikos und damit zu einer Geschwindigkeitsreduktion.

Es kann folglich die These formuliert werden, dass diese beiden Effekte die Wirkung auf die Geschwindigkeit aufheben und darum in Messungen keine Wirkung gemessen werden kann. Diese These wird auch gestützt durch die Erkenntnisse der Befragung, bei welcher sich auf Basis einer Visualisierung ohne Velofahrende der erste Effekt (Erhöhung der Geschwindigkeit) zeigt. Weitere Forschung ist nötig, um den Wirkungsmechanismus von Radstreifen zu analysieren. Es ist aber davon auszugehen, dass der dynamische «Humanfaktor» (d.h. die Wirkung des Veloverkehrsaufkommens) hier eine grössere Rolle spielt als die Markierung.

Wirkung des Mehrzweckstreifens

Die Wirkung des Mehrzweckstreifens wurde nur auf Basis des VR-Fahrsimulatorexperiments erhoben. Es zeigen sich geringe, aber paradoxe Effekte: Kurzfristig kommt es zu einer geringen Reduktion der gefahrenen Geschwindigkeit. Über die Gesamtstrecke zeigt sich keine Wirkung. Dafür kommt es zu einer subjektiven Wirkung, welche sich in einer tieferen Geschwindigkeitswahl zeigt. Diese Reduktion der subjektiven Geschwindigkeit kann nicht mit der Risikowahrnehmung und Komplexitätswahrnehmung erklärt werden. Auch hier können verschiedene konträre Mechanismen zur Erklärung der Wirkung beigezogen werden: Der Mehrzweckstreifen kann als Querungshilfe wahrgenommen werden und führt damit zu einer Erhöhung des Risikos (aufgrund dynamischer Humanfaktoren, d.h. von Personen, die anwesend oder eben nicht anwesend sind) und somit zu einer Geschwindigkeitsreduktion (dieser Zusammenhang zeigt sich aber nicht in der VR-Fahrsimulatorstudie). Andererseits kann der Mehrzweckstreifen durch die Trennwirkung genau den gegenteiligen Effekt haben und zu einer Geschwindigkeitserhöhung führen. Die Vermutung liegt nahe, dass die unterschiedlichen Wirkungen zu einer Aufhebung der Wirkung geführt haben. Weiter ist auch der Mehrzweckstreifen mit einer Verbreiterung des Strassenraums verbunden. Dies führt wiederum zu einer Geschwindigkeitserhöhung. Wenn ein Mehrzweckstreifen eingesetzt wird, dann ist eine Kombination mit anderen Elementen notwendig (z. B. Verengung der Fahrstreifen oder andere bauliche Gestaltung). Solche Kombinationen wurden in diesem Forschungsprojekt jedoch nicht getestet.

Wirkung seitlicher Parkplätze

Die Wirkung des Gestaltungselements «Parkplatz» zeigt auf Basis der Messungen im Feld sowie der subjektiven Wahrnehmung im VR-Experiment, dass diese zu einer Geschwindigkeitsreduktion führen. Erklärt werden kann diese Wirkung damit, dass mit seitlichen Parkplätzen, die wahrgenommene Gefahr von Konflikten wie auch die Komplexität steigen. Dabei gilt zu berücksichtigen, dass diese Gefahr davon abhängt, ob sich Autos auf den

Parkplätzen befinden (dynamischer Humanfaktor). Warum sich diese Wirkung in der gefahrenen Geschwindigkeit im VR-Experiment nicht zeigt, kann mit der These begründet werden, dass die Studienteilnehmenden aufgrund der Programmierung keine Bewegung in den parkierten Fahrzeugen erwarteten. Gleichzeitig wird auf Basis des Effekts des «Retinal Streaming» (vertikale Elemente im Blickwinkel können die Geschwindigkeitswahrnehmung beeinflussen) erwartet, dass die gefahrene Geschwindigkeit höher scheint als sie tatsächlich ist. Es kann sein, dass dieser Effekt bei tiefen Geschwindigkeiten (30 km/h) keine Rolle spielt.

Aufgrund der Ergebnisse wird empfohlen, eine Reduktion von Parkplätzen im urbanen Raum immer mit weiteren Gestaltungselementen zu verbinden, insbesondere an Orten, wo die Parkplätze über längere Zeit leer stehen könnten. Als wirksam zeigt sich eine Verringerung der Fahrstreifenbreite oder die Erweiterung des Grünraums mit Bäumen und Bänken.

Wirkung der Leitlinie

Das Weglassen der Leitlinie zeigt eine kurzfristige Wirkung auf die gefahrene Geschwindigkeit im VR-Fahrsimulator, aber keine Wirkung auf die subjektiv gewählte Geschwindigkeit. Der Effekt ist klein. Die Wirkung kann mit dem wahrgenommenen Risiko sowie der Komplexität erklärt werden, dies sogar teilweise für die gefahrene Geschwindigkeit. Also zeigt sich auch hier der Einfluss des dynamischen Humanfaktors (Gefahr durch entgegenkommende Autos, denen vielleicht ausgewichen werden muss), welcher durch die fehlende Leitlinie verstärkt wird. Keine Wirkung zeigt sich in den Messungen im Feld, wenn gleichzeitig die Fahrbahnbreite betrachtet wird.

Aufgrund der Ergebnisse der vorliegenden Forschung kann das Weglassen von Leitlinien nur bedingt empfohlen werden, um die Geschwindigkeit zu verringern. Eine Kombination mit weiteren Massnahmen (Geschwindigkeitsschilder und Verringerung der Fahrstreifenbreite) wird empfohlen.

Wirkung von Grünraum (Bäume und Sitzbänke)

In Bezug auf die Wirkung des Grünraums zeigen sich paradoxe Effekte: Während der Grünraum in Messungen im Feld zu einer Geschwindigkeitserhöhung führt, zeigt sich im VR-Experiment eine Reduktion der Geschwindigkeit. Subjektive Effekte bleiben aus. Es gilt auch zu berücksichtigen, dass der Grünraum ganz unterschiedlich gestaltet werden kann (z. B. Büsche versus Alleen). Dieser Umstand trägt möglicherweise auch zu den unterschiedlichen Ergebnissen bei.

Aufgrund der Ergebnisse kann der Einsatz von Grünraum und Bäumen allenfalls in Kombination mit anderen Gestaltungselementen, wie einer Verringerung der Fahrstreifenbreite oder einem Geschwindigkeitsschild, empfohlen werden. Weitere Forschung zu den Wirkungsmechanismen dieser Massnahmen ist notwendig. Dabei ist insbesondere auf den Tunneleffekt zu achten, der bei der Begrünung in Form von Alleen entsteht.

Wirkung horizontaler Versatz

Auf Basis der Messungen hängt ein horizontaler Versatz mit einer reduzierten Geschwindigkeit zusammen. Ein horizontaler Versatz eignet sich zur Geschwindigkeitsreduktion.

Wirkung Mittelinsel und Fussgängerquerungen

Entgegen der erwarteten Wirkung führen Mittelinseln und Fussgängerquerungen zu einer Erhöhung der durchschnittlich gemessenen Geschwindigkeit. Auf dieser Basis wird die These formuliert, dass solche Querungshilfen an Strassen eingesetzt werden, die aufgrund anderer Faktoren zu einer hohen Geschwindigkeit führen, d. h. die gemessene Geschwindigkeit hängt mit der Art der Strasse zusammen und nicht mit der Mittelinsel oder den Fussgängerquerungen. Möglich ist auch die Erklärung, dass mit den Querungshilfen für die Autofahrenden Klarheit geschaffen wird, wo die Gefahr von querenden Personen besteht, sodass auf dem Rest der Strecke die Geschwindigkeit erhöht werden kann. Hier sind

weitere Studien notwendig, um die Wirkungsmechanismen und die Interaktionen mit anderen Faktoren zu identifizieren.

Wirkung Geschwindigkeitsschilder

Die Auswertung der bestehenden Messungen zeigen, dass Geschwindigkeitsschilder zu einer Reduktion der gefahrenen Geschwindigkeit führen. Im Gegensatz zu den anderen Gestaltungselementen sind die Geschwindigkeitsangaben gesetzlich vorgegeben und haben für Verkehrsteilnehmende auch eine rechtliche Wirkung. Dass in der Praxis dennoch oft zu schnell gefahren wird, zeigt, dass die Ausstattung mit lediglich den gesetzlich verpflichtenden Signalen nicht ausreicht. Es wird daher empfohlen, insbesondere bei Tempo-30-Strassen und -Zonen und bei Begegnungszonen weitere Gestaltungselemente einzusetzen.

Wirkung der Fahrbahnbreite

Fahrbahnbreiten unter 4 m führen zu einer Geschwindigkeitsreduktion (Fahrbahnbreite: der Raum, der für Fahrzeuge zur Verfügung steht, exklusive Radstreifen und Parkplätze). Ist die Strasse breiter als 5 m führt dies zu einer Geschwindigkeitserhöhung. Bei der Gestaltung von Strassen sollte diese Erkenntnis mitbedacht werden, insbesondere bei Neugestaltungen von Strassen oder bei der Elimination eines Fahrstreifens. Ausserdem weisen einige Ergebnisse aus der VR-Fahrsimulatorstudie darauf hin, dass bei bestimmten Gestaltungselementen (z. B. Radstreifen, Mehrzweckstreifen) eine Interaktion mit der Fahrbahnbreite die Wirkung der Gestaltungselemente beeinflusst oder gar eliminiert.

***Tab. 69** Wirkung der Gestaltungselemente für Tempo 30*

Gestaltungs-element	**Psychologische Prozesse**	**Messung**	**VR-Fahrsimulator**			**Fazit Wirkung**
		V	M-kurz	M-lang	M-subj.	
Breites Band	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden) (Elliott et al., 2003)	-	K	K	K	Keine Wirkung messbar
Radstreifen an der Fahrbahn	Entweder: Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden, Verletzung der Velofahrenden) Oder: Verringerung der subjektiven Gefahr/des Risikos	K	K	K	E	Keine Wirkung auf die gefahrene Geschwindigkeit messbar Erhöhung der subjektiven Geschwindigkeit > Zusammenhang mit wahrgenommenem Risiko und Komplexität
Mehrzweck-streifen	Verringerung der subjektiven Gefahr/des Risikos	-	E (ms)	K	R	Kurzfristige Erhöhung der gemessenen Geschwindigkeit im VR-Experiment Reduktion der subjektiven Geschwindigkeit > Kein Zusammenhang mit wahrgenommenem Risiko und Komplexität
Seitliche Park-plätze	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der anderen Fahrenden) (Elliott et al., 2003)	R	K	K	R	Reduktion bei Geschwindigkeitsmessung auf der Strasse Reduktion der subjektiven Geschwindigkeit > Zusammenhang mit wahrgenommenem Risiko und Komplexität
Keine Leitlinie	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden) (Elliott et al., 2003)	K	R (ms)	K	K	Reduktion der gefahrenen Geschwindigkeit im VR-Experiment (kurzfristig) Keine Wirkung bei subjektiver Geschwindigkeit
Bäume und Sitzbänke auf dem Trottoir	Erhöhung der zu verarbeitenden Informationen führt zu einer Erhöhung der Aufmerksamkeit und Reduktion der Geschwindigkeit	E (b)	R	R	K	Paradoxe Wirkung: Erhöhung bei Geschwindigkeitsmessung auf der Strasse Reduktion der Geschwindigkeit im Fahrsimulator Keine Wirkung bei subjektiver Geschwindigkeit
Horizontaler Versatz	Erhöhung der Komplexität führt zu einer Erhöhung der Aufmerksamkeit und Reduktion der Geschwindigkeit; objektives Hindernis in der Fahrbahn	R				Reduktion der gemessenen Geschwindigkeit
Mittelinsel		E				Erhöhung der gemessenen Geschwindigkeit
Fussgänger-querungen	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Verletzung der Fahrenden) (Elliott et al., 2003)	E				Erhöhung der gemessenen Geschwindigkeit

Geschwindigkeitsschild	Information	R		Reduktion der gemessenen Geschwindigkeit
Fahrbahnbreite	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos bei geringerer Fahrstreifenbreite (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden) (Elliott et al., 2003)	E (je breiter, desto schneller)		Erhöhung der gemessenen Geschwindigkeit (bei Verbreiterung)

Anmerkungen. V = Unterschiede gemessen auf Basis der Durchschnittsgeschwindigkeit. M-kurz = Unterschiede auf Basis der mittleren Geschwindigkeit im Fahrsimulator auf Streckenabschnitt 50 m–100 m, M-lang = Mittlere Geschwindigkeit im Fahrsimulator auf Streckenabschnitt 50 m–225 m, M-subj. = Mittelwert der bevorzugten Geschwindigkeit gemäss Befragung. K = Kein Unterschied zur Vergleichsstrecke, R = Signifikante Reduktion der Geschwindigkeit in Bezug auf die Vergleichsstrecke, E = Signifikante Erhöhung der Geschwindigkeit in Bezug auf die Vergleichsstrecke. (b) Gemessen als Grünraum, (ms) marginal signifikant

5.1.3 Wirkung der Gestaltungselemente bei Tempo 50

Die Diskussion der Wirkung der Gestaltungselemente bei Tempo 50 basiert auf bestehenden und neuen Messungen im Feld. Auch hier zeigt sich ein diverses Bild, welches auf Basis einer differenzierten Darstellung zusammengefasst wird. Tab. 70 gibt einen Überblick über die Ergebnisse.

Wirkung Parkplätze

Die Wirkung des Gestaltungselements Parkplatz zeigt auf Basis der bestehenden Messungen, dass entlang von Strassen mit Parkplätzen langsamer gefahren wird. Einerseits beeinflussen Parkplätze – wenn diese intensiv genutzt werden – die Fahrgeschwindigkeit wegen des Ein- und Ausparkierens sowie des Suchverkehrs. Zudem kann die Wirkung auf dem wahrgenommenen Risiko basieren.

Angesichts dieser Ergebnisse gilt es auch bei Tempo 50 zu berücksichtigen, dass bei einer Elimination von Parkplätzen Begleitmassnahmen wichtig sind, um eine Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit zu vermeiden.

Wirkung Radstreifen

Auf Strassen mit einem Radstreifen wird gleich schnell gefahren wie auf Strassen ohne Radstreifen. Bei Tempo 50 scheint dieses dynamisch wirkende Element keinen Einfluss auf die gefahrene Geschwindigkeit zu haben. Es gilt aber auch zu bedenken, dass konträre Effekte die Wirkung allenfalls aufheben, d. h. bei Anwesenheit von Velofahrenden wirkt der Radstreifen verlangsamend und bei Abwesenheit von Velofahrenden beschleunigend (vgl. auch entsprechender Abschnitt bei Tempo 30).

Wirkung Mittelinsel und Fussgängerüberquerungen

Auf Basis der Messungen zeigt sich, dass entlang von Strassen mit einer Mittelinsel langsamer gefahren wird. Es wird angenommen, dass die punktuelle Verengung der Strasse zu diesem Effekt führt.

Die Wirkungsmessung des Gestaltungselements Fussgängerüberquerung mit Messungen im Feld zeigt, dass dieses zu einer Erhöhung der Geschwindigkeit führt. Nur die Anwesenheit einer Markierung reicht somit für eine Geschwindigkeitsreduktion nicht aus.

Wirkung der Fahrbahnbreite

Es gibt keinen Unterschied in der Fahrgeschwindigkeit zwischen Strassen, die eine Breite von 5 m bis 6 m haben, und Strassen, die breiter als 6 m sind.

Wirkung der Leitlinien

Bei der Auswertung der Wirkung der Leitlinien wurde entschieden, zwischen Strassen, die keine Leitlinien haben (Strassenbreite < 5.5 m) und Strassen, die breiter als 5.5 m sind, zu unterscheiden.

Bei einem Tempolimit von 50 km/h wird auf den Strassen mit Gegenverkehr und einer Sicherheitslinie schneller gefahren als auf den Strassen mit einer Leitlinie und auf den Strassen, die schmaler als 5.5 m sind. Die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Strassen mit einer Leitlinie und Strassen schmaler als 5.5 m sind nicht signifikant.

***Tab. 70** Wirkung der Gestaltungselemente für Tempo 50*

Gestaltungs-element	Psychologische Prozesse	Messung	Fazit Wirkung
Radstreifen an der Fahrbahn	Entweder: Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden, Verletzung der Velofahrenden) Oder: Verringerung der subjektiven Gefahr/des Risikos	K	Keine Wirkung messbar
Mehrzweck-streifen	Verringerung der subjektiven Gefahr/des Risikos	-	
Seitliche Park-plätze	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der anderen Fahrenden) (Elliott et al., 2003)	R	Reduktion der Geschwindigkeit
Keine Leitlinie	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden) (Elliott et al., 2003)	K	Keine Wirkung messbar
Bäume und Sitzbänke auf dem Trottoir	Erhöhung der zu verarbeitenden Informationen führt zu einer Erhöhung der Aufmerksamkeit und Reduktion der Geschwindigkeit	-	
Horizontaler Versatz	Erhöhung der Komplexität führt zu einer Erhöhung der Aufmerksamkeit und Reduktion der Geschwindigkeit; objektives Hindernis in der Fahrbahn	K	Keine Wirkung messbar
Mittelinsel		R	Reduktion der Geschwindigkeit
Fussgänger-überquerungen	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Verletzung der Fahrenden) (Elliott et al., 2003)	K	Keine Wirkung messbar
Geschwindig-keitsschild	Information	E	Erhöhung der Geschwindigkeit
Fahrstreifen-breite	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos bei geringerer Fahrstreifenbreite (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden) (Elliott et al., 2003)	K	Keine Wirkung messbar

Anmerkungen. V = Unterschiede gemessen auf Basis der Durchschnittsgeschwindigkeit. K = Kein Unterschied zur Vergleichsstrecke, R = Signifikante Reduktion der Geschwindigkeit in Bezug auf die Vergleichsstrecke, E = Signifikante Erhöhung der Geschwindigkeit in Bezug auf die Vergleichsstrecke

5.1.4 Diskussion der Ergebnisse im Vergleich zur nationalen und internationalen Literatur – Innerorts

Nachfolgend werden die Ergebnisse der vorliegenden Studie vor dem Hintergrund der nationalen und internationalen Forschung diskutiert. Der Vergleich erfolgt entlang der Gestaltungselemente.

Gleichzeitig möchten wir darauf hinweisen, dass Strassentypen innerorts, d.h. Begegnungszonen und Tempo-30-Zonen, sehr vielfältige Verkehrsregimes mit zahlreichen unterschiedlichen Einflussfaktoren sind. Wie bereits in der Wirkungskontrolle von Begegnungszonen durch Pestalozzi und Stäheli (2017) erkannt, ist gerade die Begegnungszone ein sehr «facettenreicher Untersuchungsgegenstand», wobei jede ihren eigenen Charakter und ihre eigenen verkehrlichen und räumlichen Rahmenbedingungen hat, was quantitative Untersuchungen erschweren kann. Die geringen statistischen Zusammenhänge oder gar das Fehlen solcher bestätigt dies in der vorliegenden Studie zusätzlich. Gleichzeitig kann aufgezeigt werden, welche Elemente, unabhängig vom Charakter der Begegnungszone oder der Tempo-30-Strasse, Einfluss auf die Geschwindigkeit haben. Die Resultate bezüglich Tempo-30-Strassen und Begegnungszonen sind für die Anwendung in der Planungspraxis somit immer vor diesem Hintergrund zu betrachten.

Radstreifen

In der vorliegenden Studie zeigen sich paradoxe Effekte in Bezug auf die Wirkung von Radstreifen. Dieses heterogene Bild zeigt sich auch in der bisherigen Forschung: In verschiedenen niederländischen Feldstudien zeigen sich Effekte in Kombination mit einer objektiven Verbreiterung des Radstreifens und einer entsprechenden Verengung der Fahrbahn für die Autos (Gemeente Hof van Twente, 2016; Gemeente Oostzaan, 2019). Die Ergebnisse der vorliegenden VR-Experimente bestätigen die oben aufgeführten Befunde insofern, als aufgrund der tatsächlichen Verbreiterung der Fahrbahn kein Effekt auf die objektiv gefahrene Geschwindigkeit gemessen werden konnte. Aus subjektiver Perspektive zeigen die Studienergebnisse auf, dass der Radstreifen sogar zu einer Erhöhung der gewählten Geschwindigkeit führen könnte. Auch die Messungen im Feld sowohl auf Tempo-30- wie auch auf Tempo-50-Strassen konnten keinen Effekt aufzeigen, weil vermutlich die Radstreifen nicht oder nur teilweise mit einer Fahrstreifenreduktion einhergingen.

Die Erkenntnisse von Chinn und Elliot (2002) sind die Grundlage für die in Abschnitt 5.1.2 formulierte These, dass dynamische Elemente (Effekt von Radstreifen nur in Anwesenheit von Velofahrenden nachgewiesen) die Wirkung von Radstreifen auf die gefahrene Geschwindigkeit beeinflussen. Die vorliegende Studie bestätigt diese Annahme dahingehend, dass eine subjektive Beurteilung der Strasse mit Radstreifen, aber ohne Velofahrende, sogar zu einer Geschwindigkeitserhöhung führen kann. Auf dieser Basis kann festgehalten werden, dass Radstreifen nicht per se zu einer Geschwindigkeitsreduktion führen. Zu beachten ist, dass das zu erwartende Veloverkehrsaufkommen sowie die Strassenbreite die Wirkung des Radstreifens massgeblich beeinflussen.

Weiter gilt es zu berücksichtigen, dass Radstreifen als solche eine wichtige Funktion erfüllen: Es wird Raum für Velofahrende geschaffen, welcher dazu beiträgt, dass die Strassen von Velofahrenden als sicherer wahrgenommen werden, was zu einer Erhöhung der Bereitschaft zum Velofahren auf dieser Strasse führt. Diese Hauptfunktion sollte bei der Planung und Umsetzung von Radstreifen im Fokus liegen.

Parkplätze

In Übereinstimmung mit den Erkenntnissen aus der Literatur (Chinn & Elliott, 2002; Elliott et al., 2003; Gargoum et al., 2016; Molino, 2009) kommt die vorliegende Studie in den Messungen sowohl auf Tempo-50- wie auch auf Tempo-30-Strassen zu dem Schluss, dass Parkplätze zu einer Reduktion der gefahrenen Geschwindigkeit führen. Dieser Effekt zeigt sich auch deutlich in der subjektiv gewählten Geschwindigkeit in der Befragung im VR-Fahrsimulatorexperiment. Die Daten aus der Befragungsstudie zeigen auch, dass die

tiefere Geschwindigkeit subjektiv mit der Risikowahrnehmung sowie der wahrgenommenen Komplexität zusammenhängt.

Diese Übereinstimmung mit der Befundlage unterstreicht die Bedeutung von Begleitmassnahmen beim Parkplatzabbau, welcher aus ökologischen Gründen sowie zur Verbesserung der Platznutzung vielerorts in der Schweiz geplant ist.

Trennung der Fahrbahn

Nur wenige Studien haben sich mit der Wirkung der Trennung der Fahrbahn innerorts befasst. Während ausserorts in den bestehenden Studien keine Wirkung dokumentiert wird, zeigt sich in einer Studie aus England eine kleine Reduktion der Geschwindigkeit innerorts, wenn die Leitlinie entfernt wird. Auf Basis der vorliegenden Studie bleibt die Befundlage unklar: Weder auf Tempo-30- noch auf Tempo 50-Strassen konnte ein Effekt gemessen werden. Bei Messungen in Tempo-30-Zonen ist die Anzahl der Strassen mit Leitlinie zu gering, weshalb die Ergebnisse bedingt aussagekräftig sind. Auch der marginale Effekt, welcher sich in der Fahrsimulatorstudie bei Tempo 30 zeigt, ist nur kurzfristig nachweisbar.

Im Hinblick auf diese Befundlage bleibt die Wirkung der Entfernung von Leitlinien auf die Geschwindigkeitswahl unklar.

Grünraum

Die Befundlage in Bezug auf die Wirkung von Bäumen und Grünraum zeigt ein gemischtes Bild. Bisherige Studien zeigen einen kleinen Effekt in Richtung einer Geschwindigkeitsreduktion. In der vorliegenden Studie finden sich wiederum paradoxe Effekte: Die Messungen im Feld der vorliegenden Studie weisen auf eine Erhöhung der Geschwindigkeit auf Strassen mit Tempo 30 hin. In der VR-Fahrsimulatorstudie hingegen fuhren die Teilnehmenden mit einer signifikant geringeren Geschwindigkeit. Vermutlich ist die Erklärung für die paradoxen Effekte in der unterschiedlichen Ausgestaltung von Grünraum zu suchen.

Geschwindigkeitsschilder

Die Erkenntnisse aus den Messungen im Feld der vorliegenden Studie sind in Übereinstimmung mit den Erkenntnissen von Grolimund et al.(2017) und Fitzpatrick et al. (2001): Geschwindigkeitsschilder führen zu einer statistisch relevanten Reduktion der gefahrenen Geschwindigkeit in Tempo-30-Strassen. Die Ergebnisse aus der VR-Fahrsimulatorstudie des vorliegenden Projektes bieten eine weitere Grundlage für die Annahme, dass Geschwindigkeitsschilder ein wichtiger Einflussfaktor für die gefahrene Geschwindigkeit sind: Die gefahrene Geschwindigkeit (auf allen Strecken mit Geschwindigkeitsschildern) war im VR-Fahrsimulator deutlich tiefer als die erwartete Geschwindigkeitslimite in der Befragung.

Im Gegensatz zu diesen Befunden gibt es jedoch auch mehrere Studien, die zeigen, dass Geschwindigkeitsschilder nur in Kombination mit baulichen Massnahmen eine Wirkung zeigen. Es gilt auch darauf hinzuweisen, dass der Effekt bei höheren Geschwindigkeiten nicht mehr nachzuweisen ist.

Fahrstreifenbreite und Fahrbahnbreite

Im Hinblick auf die Wirkung der Fahrstreifenbreite sind die Erkenntnisse aus den Messungen im Feld in Tempo-30-Strassen in der vorliegenden Studie in Übereinstimmung mit der bisherigen Forschung: Je geringer die Fahrbahnbreite, desto geringer die gewählte Geschwindigkeit (Fitzpatrick et al., 2001; Lindenmann & Leeman, 2008; Montella & Mauriello, 2011). Bei höheren Geschwindigkeiten ist dieser Effekt in der vorliegenden Studie nicht nachweisbar.

Diese Übereinstimmung in der Forschung unterstreicht die Bedeutung, die der Fahrstreifenbreite bei der Planung und Umsetzung von Tempo-30-Zonen zukommt. Bei breiten Strassenquerschnitten ist sorgfältig in Erwägung zu ziehen, wie der Platz genutzt wird.

Horizontaler Versatz

Vergleichbar zu bisherigen Studien zeigt auch die vorliegende Studie, dass horizontale Versätze (zumeist in Form von seitlichen Parkplätzen) auf Tempo-30-Strassen nachweislich zu einer Geschwindigkeitsreduktion führen (Molino, 2009). Diese Erkenntnisse sind im Widerspruch zur in der Schweiz durchgeführten Studie, welche keine messbaren Unterschiede zeigte (Schwarz et al., 2010). Für Strassen mit langsamerem oder schnellerem Temporegime konnte keine Wirkung nachgewiesen werden.

Fussgängerquerungen

Die Wirkung von Fussgängerquerungen auf die gefahrene Geschwindigkeit wurde in bisherigen Studien nicht untersucht. Bei Fussgängerquerungen gilt es zu berücksichtigen, dass diese in der Strassengestaltung dem Hauptzweck der Querungshilfe dienen. Weitere Nebeneffekte in Bezug auf die Wirkung auf die Geschwindigkeitswahl sind insofern in die Entscheidungsfindung einzubeziehen, als allfällige Begleitmassnahmen notwendig sind. Querungshilfen sollten aber nicht per se für den Zweck der Geschwindigkeitsreduktion eingesetzt werden.

Breites Band, Mittelinsel und Mehrzweckstreifen

Die Wirkung des breiten Bandes, der Mittelinsel und des Mehrzweckstreifens auf die gefahrene Geschwindigkeit wurde in bisherigen Studien auf Strassen innerorts nicht untersucht.

5.2 Wirkung der Gestaltungselemente ausserorts

5.2.1 Wirkung der Gestaltungselemente bei Tempo 80

Die Wirkung der Gestaltungselemente bei Tempo 80 wurde ausschliesslich auf Basis der VR-Fahrsimulatorexperimente erhoben. Durchschnittlich wurde im VR-Fahrsimulator auf diesen Strecken 82 km/h gefahren. Insgesamt zeigen alle Gestaltungselemente eine Wirkung auf die gefahrene Geschwindigkeit (Geschwindigkeitsreduktionen im Bereich von 1 bis 2 km/h) wie auch auf die subjektiv gewählte Geschwindigkeit. Tab. 71 gibt einen Überblick über die Ergebnisse. Der Effekt auf die gefahrene Geschwindigkeit zeigt sich nur über die Gesamtstrecke und nicht kurzfristig. Für die einzelnen Elemente zeigen sich folgende Wirkungen:

Wirkung des breiten Bandes

Das breite Band zeigt im VR-Experiment eine geschwindigkeitsreduzierende Wirkung, sowohl in der gefahrenen Geschwindigkeit als auch in der subjektiv gewählten Geschwindigkeit. Der Effekt auf die subjektive Geschwindigkeit kann mit der wahrgenommenen Komplexität erklärt werden. Aufgrund dieser Ergebnisse werden Pilotstudien im Feld mit einem breiten Band auf einer Tempo-80-Strecke empfohlen.

Wirkung des breiten Bandes mit Muster

Das breite Band mit Muster zeigt keine Wirkung auf die gefahrene Geschwindigkeit. Eine Wirkung zeigt sich auf die subjektiv gewählte Geschwindigkeit. Hier zeigt sich wiederum eine Reduktion der Geschwindigkeit, welche mit der wahrgenommenen Komplexität erklärt werden kann. Warum das breite Band mit Muster keine Wirkung bei der gefahrenen Geschwindigkeit zeigt, bleibt unklar.

Wirkung des breiten Bandes und einer breiten Mittellinie mit Muster

Das breite Band in Kombination mit einer breiten Mittellinie mit Muster zeigt wiederum eine geschwindigkeitsreduzierende Wirkung, sowohl in der gefahrenen Geschwindigkeit als auch in der subjektiv gewählten Geschwindigkeit. Die Wirkung auf subjektiver Ebene kann mit der Risikowahrnehmung und der Komplexität in Verbindung gebracht werden. Aufgrund

dieser Ergebnisse werden Pilotstudien im Feld mit einem breiten Band und breiter Mittellinie mit Muster auf einer Tempo-80-Strecke empfohlen.

Wirkung der fehlenden Leitlinie

Das Fehlen einer Leitlinie führt ebenfalls zu einer Geschwindigkeitsreduktion, sowohl in der gefahrenen als auch in der subjektiv gewählten Geschwindigkeit. Die Wirkung auf subjektiver Ebene kann mit der Risikowahrnehmung und der Komplexität in Verbindung gebracht werden. Auch auf Basis dieser Ergebnisse werden Pilotstudien im Feld auf Tempo-80-Strecken ohne Leitlinie empfohlen.

***Tab. 71** Wirkung der Gestaltungselemente für Tempo 80*

Gestaltungs-element	**Psychologische Prozesse**	**VR-Fahrsimulator**			**Fazit Wirkung**
		M-kurz	M-lang	M-subj.	
Breites Band	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden) (Elliott et al., 2003)	K	R	R	Reduktion der Geschwindigkeit im Fahrsimulator Reduktion der subjektiven Geschwindigkeit
Breites Band mit Muster	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden) (Elliott et al., 2003) Hinweisreize in der Peripherie erhöhen die wahrgenommene Geschwindigkeit	K	K	R	Keine Wirkung im Fahrsimulator Reduktion der subjektiven Geschwindigkeit; kein Zusammenhang mit wahrgenommenem Risiko und Komplexität
Breites Band mit Muster und breiter Mittellinie mit Muster	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden) (Elliott et al., 2003) Hinweisreize in der Peripherie erhöhen die wahrgenommene Geschwindigkeit Oder: Verringerung der subjektiven Gefahr/des Risikos	K	R (ms)	R	Reduktion der Geschwindigkeit im Fahrsimulator Reduktion der subjektiven Geschwindigkeit; Zusammenhang mit wahrgenommenem Risiko und Komplexität
Keine Leitlinie	Erhöhung der subjektiven Gefahr/des Risikos (Beschädigung des Fahrzeugs, Verletzung der Fahrenden) (Elliott et al., 2003)	K	R	R	Reduktion der Geschwindigkeit im Fahrsimulator Reduktion der subjektiven Geschwindigkeit; Zusammenhang mit wahrgenommenem Risiko und Komplexität

Anmerkung: V = Unterschiede gemessen auf Basis der Durchschnittsgeschwindigkeit, M-kurz = Unterschiede auf Basis der mittleren Geschwindigkeit im Fahrsimulator auf Streckenabschnitt 50 m–100 m, M-lang = Mittlere Geschwindigkeit im Fahrsimulator auf Streckenabschnitt 50 m–225 m, M-subj. = Mittelwert der bevorzugten Geschwindigkeit gemäss Befragung. K = Kein Unterschied zur Vergleichsstrecke, R = Signifikante Reduktion der Geschwindigkeit in Bezug auf die Vergleichsstrecke, E = Signifikante Erhöhung der Geschwindigkeit in Bezug auf die Vergleichsstrecke, (ms) marginal signifikant

5.2.2 Diskussion der Ergebnisse im Vergleich zur nationalen und internationalen Literatur – Ausserorts

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse aus der vorliegenden Studie – basierend auf der VR-Fahrsimulatorstudie – mit den Erkenntnissen aus der nationalen und internationalen Forschung zu Ausserortsstrassen verglichen. Der Vergleich erfolgt entlang der Gestaltungselemente.

Breites Band

In der bisherigen Forschung zeigte sich kein nachweislicher Effekt eines breiten Bandes auf die gefahrene Geschwindigkeit (Davidse & van Driel, 2002). Im Gegensatz dazu konnte in der vorliegenden Studie ein Effekt des breiten Bandes (ohne Muster) nachgewiesen werden. Bei einem Band mit diagonaler Musterung hingegen konnte in dieser Studie – im Kontrast zu den Ergebnissen der Studie von Charlton (2007) – kein statistisch relevanter Einfluss auf die gefahrene Geschwindigkeit identifiziert werden.

Trennung der Fahrbahnen

Godley et al. (2004) konnten in ihren Studien für ausserorts keinen Effekt einer Trennung der Fahrbahn auf die gefahrene Geschwindigkeit messen. Im Gegensatz zu bestehenden Studien konnte in dieser Studie eine statistisch relevante Wirkung einer fehlenden Leitlinie aufgezeigt werden.

Eine nachweisliche Wirkung ausserorts zeigen in bisherigen Studien gemusterte Mittelstreifen (Charlton, 2007; de Waard et al., 1995) sowie farblich gestaltete Mittelstreifen (Taylor et al., 2002). Eine gemusterte Mittellinie führte auch in der vorliegenden Studie in Kombination mit einem breiten Band zu einem statistisch nachweisbaren Effekt auf die gefahrene Geschwindigkeit.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Befundlage für Strassen ausserorts heterogen ist. Insgesamt ist dies ein weiterer Indikator für die These, dass die Auswirkungen der Strassengestaltung auf die gefahrene Geschwindigkeit von verschiedenen Faktoren abhängen, welche in unterschiedlichen Studiendesigns nicht kontrolliert werden können.

5.3 Fazit zu den verwendeten Methoden der Wirkungsmessung

Alle verwendeten Methoden der Messung der Wirkung von Gestaltungselementen auf die gewählte Geschwindigkeit sind mit spezifischen Vorteilen, aber auch mit Herausforderungen verbunden. Die relevantesten dieser Vorteile und Herausforderungen im Kontext dieser Studie sollen an dieser Stelle aufgegriffen werden:

5.3.1 Messungen im Feld

Vorteile

Zentraler Vorteil der Wirkungsmessung von Gestaltungselementen auf die gefahrene Geschwindigkeit mittels Messungen im Feld ist, dass diese auf Basis der tatsächlich gewählten Geschwindigkeit erhoben werden. Die Ergebnisse, die in der vorliegenden Studie auf Messungen im Feld basieren, weisen damit eine hohe ökologische Validität auf. Weitere Forschung könnte Vorher-/Nachher-Messungen anwenden. Somit könnten Änderungen in der Strassenraumgestaltung durchgeführt werden und deren Wirkung könnte direkt im Feld überprüft werden, ohne dass unterschiedliche andere Kontextfaktoren die Wirkung beeinflussen.

Herausforderungen

Gegenüber den genannten Vorteilen zeigen sich bei Messungen im Feld auch verschiedene Herausforderungen, die nachfolgend aufgelistet sind.

- Heterogenität der Messorte: Nicht alle Attribute können erfasst werden.
- Heterogenität der externen Faktoren: Wetter, Anlässe, Unfälle usw.
- Bestimmte Attribute, welche einen Einfluss auf die Geschwindigkeit haben, können nicht oder kaum erfasst werden: Fussverkehrsaufkommen, Veloverkehrsaufkommen.
- Bei der Benutzung von Messblättern gibt es eine Vielzahl von Kennzahlen. Dabei sind nicht immer die gleichen Kennzahlen vorhanden.
- Die Erhebung der Attribute erfolgt oft nicht gleichzeitig mit der Erhebung der Geschwindigkeit.

5.3.2 VR-Fahrsimulatorexperiment

Vorteile

Die Vorteile von Fahrsimulatoren allgemein sind in Abschnitt 1.2.4 dargelegt. Sie konnten auch für die vorliegende Studie bestätigt werden:

- Der Einsatz des VR-Fahrsimulators erlaubte die Kontrolle über die beurteilten Konditionen und eine klare Zuschreibung der Kausalität.
- Der VR-Fahrsimulator erlaubte die Kontrolle über die Kontextbedingungen (Attribute, Verkehrsaufkommen, Witterung)
- Der Einfluss der Charakteristiken der Fahrenden kann erhoben und kontrolliert werden.
- Weiter bietet der VR-Fahrsimulator die Möglichkeit, nicht-existierende Gestaltungselemente zu testen.
- Fahrsimulatoren bieten eine sichere Umgebung für die Umsetzung und Wirkungsmessung von unterschiedlichen Strassengestaltungen.
- In Kombination mit einer Befragung erlaubt die Laborstudie einen Einblick in psychologische Prozesse und ermöglicht eine Erklärung der psychologischen Mechanismen, die zur Wirkung der Gestaltungselemente beitragen.

Herausforderungen

In der vorliegenden Studie zeigten sich aber auch verschiedene Herausforderungen in Zusammenhang mit dem Einsatz des VR-Fahrsimulators:

- Wegen der beschränkten Dauer eines Experiments kann nur eine begrenzte Anzahl von Experimentalkonditionen getestet werden. Der Test von Kombinationen war im Rahmen der vorliegenden Studie nur beschränkt möglich.
- Gleichzeitig ist die Dauer pro Proband – im Vergleich zu anderen Erhebungsmethoden – lang: Dies zeigte sich auch in der Tatsache, dass es schwieriger war, Probanden zu finden.
- Experimente können nur vor Ort stattfinden. Dies erschwert wiederum die Rekrutierung von Probanden.
- Auch wenn die 3D-Simulation möglichst nahe an der Realität gestaltet wurde, bleibt letztlich eine Diskrepanz zwischen der Realität und der Simulation bestehen. Es bleibt darum unklar, inwiefern die ökologische Validität gegeben ist. Je nach Simulator kann die Fahrqualität verbessert werden und damit die ökologische Validität erhöht werden.

Die vorliegende Forschungsarbeit verfolgte mit der Wahl eines Mixed-Methods-Ansatzes zusätzlich das Ziel, die Ergebnisse aus den unterschiedlichen Ansätzen durch Triangulation zu validieren. Diesem Ziel konnte sich die Forschungsarbeit nur annähern. Der Vergleich der Ergebnisse, welche auf Basis unterschiedlicher Methoden gewonnen wurden, zeigt ein heterogenes Bild. Nur wenige der Ergebnisse sind in Übereinstimmung. Dies bietet Grundlage zur Annahme, dass eine Vielzahl von Variablen auf die Wirkung der Gestaltungselemente auf die gefahrene Geschwindigkeit Einfluss nehmen. So sind es in erster Linie auch dynamische Faktoren, welche in Interaktion mit der Strassengestaltung das tatsächliche Geschwindigkeitsverhalten von Autofahrenden determinieren.

5.4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die vorliegende Forschungsarbeit leistet einen Beitrag für ein besseres Verständnis der Wirkung von einzelnen Gestaltungselementen auf die gefahrene Geschwindigkeit:

Innerorts zeigen ausgewählte Gestaltungselemente einen nachweislichen, aber kleinen Einfluss auf die gefahrene Geschwindigkeit. Es sind dies die Fahrstreifenbreite, seitliche Parkplätze und Grünraum. Ein klareres Bild zeigt sich ausserorts. Hier konnte mit den untersuchten neuen Gestaltungselementen eine kleine und konsistente Wirkung auf die gefahrene Geschwindigkeit nachgewiesen werden.

Auf Basis der empirischen Studien zeigen sich bei verschiedenen Gestaltungselementen innerorts aber auch widersprüchliche Effekte. Insbesondere zeigen sich diese widersprüchlichen Effekte, wenn dynamische Faktoren wie Fussverkehrsaufkommen oder Veloverkehrsaufkommen mit der Wirkung der Gestaltungselemente interagieren. Dies ist beispielsweise bei Mehrzweckstreifen oder Radstreifen der Fall. Die ausbleibende Wirkung von Parkplätzen auf die gefahrene Geschwindigkeit im VR-Fahrsimulatorexperiment könnte auch auf dynamische Faktoren zurückgeführt werden. Ebenfalls widersprüchliche Effekte zeigen sich, wenn die Ausgestaltung des Gestaltungselements stark variiert. Dies ist beim Grünraum der Fall.

Den genannten Gestaltungselementen mit dynamischer Wirkung (Parkplätze, Radstreifen, Grünraum) kommt in der aktuellen Schweizer Strassenraumgestaltung aus unterschiedlichen Gründen eine grosse Bedeutung zu. Darum gilt es in zusätzlicher Forschung zu ergründen, wie mit zusätzlichen Massnahmen der Interaktion Rechnung getragen werden kann und übermässigen Geschwindigkeiten entgegengewirkt werden kann.

Weiter konnten in der vorliegenden Studie Hinweise auf die Wirkungsmechanismen der Gestaltungselemente (wahrgenommene Risiken oder Komplexität) gewonnen werden. Auch die dynamische Wirkung der Gestaltungselemente kann möglicherweise mit diesen psychologischen Faktoren erklärt werden, da Risiko- und Komplexitätswahrnehmung mit dem Fussverkehrs- und Veloverkehrsaufkommen erklärt werden könnte. Zur wissenschaftlichen Begründung dieser Zusammenhänge sind weiterführende Studien notwendig, die psychologische Faktoren zur Risikowahrnehmung und Verständlichkeit der Strassengestaltung berücksichtigen.

Für einige Gestaltungselemente konnten aufgrund der Messungen und der VR-Fahrsimulatorstudie keine statistisch signifikanten Effekte auf die gefahrenen Geschwindigkeiten gemessen werden. Dies trifft zum Beispiel auf die Wirkung von Versätzen bei Tempo 30 zu. Aufgrund der angewandten Methodik kann aber daraus nicht direkt abgeleitet werden, dass diese Gestaltungselemente wirkungslos sind. Es könnte zum Beispiel auch sein, dass diese Elemente insbesondere auf Strassen vorgesehen wurden, wo ohne diese Elemente noch höhere Geschwindigkeiten verzeichnet würden.

Ausserorts bietet die vorliegende Forschungsarbeit die Grundlage für erfolgsversprechende Gestaltungsmassnahmen, welche wirkungsvoll zu einer Temporeduktion führen. Konkret sind es die Gestaltungselemente «breites Band», «breites Band in Kombination mit einer breiten Mittellinie mit Muster» sowie «fehlende Leitlinie», die eine kleine und konsistente quantifizierbare Geschwindigkeitsreduktion im Bereich von 1 bis 2 km/h bewirken. Die Wirkung dieser bisher noch nicht existierenden Gestaltungsmerkmale bei Tempo 80 sollte in Pilotstudien im Feld überprüft werden.

Zusammengefasst zeigt das vorliegende Forschungsprojekt, dass mit den hier angewendeten Methoden die einzelne Wirkung der Gestaltungselemente auf die gefahrene Geschwindigkeit klein ist. Dennoch hat diese Wirkung einen exponentiell grösseren Effekt auf die Unfallschwere. Aus verschiedenen weiteren Gründen – z.B. Reduktion von Lärmemissionen, Erhöhung der Aufenthaltsqualität – sind in der Strassenraumgestaltung auch grössere Effekte von Relevanz. Vor diesem Hintergrund empfehlen sich weiterführende Studien zur Wirkung von Kombinationen von Gestaltungselementen.

Um mit den mit Messungen einhergehenden Herausforderungen umzugehen, empfiehlt es sich in zukünftiger Forschung, die Wirkung von Gestaltungselementen mit Vorher-/Nachher-Messungen zu untersuchen. Vorher-/Nachher-Messungen erlauben es, entlang der gleichen Strecke den Effekt der Gestaltung zu evaluieren. Dieses Vorgehen kombiniert den Vorteil der Kontrolle über Kontextfaktoren aus experimentellen Untersuchungsdesigns mit dem Vorteil der Validität aus Feldstudien.

In Übereinstimmung mit zahlreichen Studien im Bereich der Verkehrssicherheit zeigt auch das vorliegende Forschungsprojekt, dass das Verhalten im Strassenverkehr nur multikausal erklärt werden kann und dass bei dessen Untersuchung Faktoren der Infrastruktur wie auch der Sozialpsychologie berücksichtigt werden müssen.

Auf Basis der Erkenntnisse der Studie lassen sich die folgenden übergeordneten **Thesen für Planungsprinzipien des Strassenraums** ableiten. Die gefahrene Geschwindigkeit von Autofahrenden kann reduziert werden, wenn zusätzlich zu den gesetzlich notwendigen Elementen (Markierungen und Signale) ...

- **… Menschen** in irgendeiner Form im Strassenraum präsent sind oder bald sein könnten, sei es als mögliche Aussteigende aus einem seitlich parkierten Fahrzeug, als Querende, als Velofahrende, als Ablenkende auf dem Trottoir, als entgegenkommende Fahrzeuge (insbesondere bei fehlender Leitlinie) etc.

- **… die physisch zur Verfügung stehenden Fahrflächen** nicht zu breit sind resp. nicht als breit wahrgenommen werden. Dafür ist nicht ausschliesslich die Fahrbahnbreite relevant, sondern auch die zusätzlich mögliche nutzbare Fahrfläche wie bspw. Ein Radstreifen oder ein Trottoir, welches eingeebnet ist. Auch breite Bänder und Mehrzweckstreifen ohne Vertikalversatz zählen dazu.

- … die **optische Kontrolle über den Strassenraum reduziert** wird. Dazu gehören die Sichtverhältnisse, welche durch die physischen Gestaltungselemente beeinflusst werden, aber auch die Regelmässigkeit des Raums. Ein Strassenraum mit starker gestalterischer Regelmässigkeit auf beiden Strassenseiten erhöht die wahrgenommene Kontrolle über den Raum. Diesen Effekt haben auch breite Bänder und Mehrzweckstreifen, die die **Linearität** des Strassenraums zusätzlich verstärken, wenn sie nicht vielfältig und abwechslungsreich gestaltet oder mit anderen entsprechend unregelmässigeren Gestaltungselementen ergänzt werden.

Anhang

I Fragebogen für VR-Experiment 134
I.1 Streckenabschnitte 134
I.2 Momentanes Wohlbefinden 134
I.3 Fahrerlebnis in Virtual Reality 137
I.3.1 Virtual-Reality-Umgebung 137
I.3.2 Fahrerlebnis 137
I.4 Fahrstil 139
I.5 Einschätzung Fahrpraxis 141
I.6 Fahrpraxis 142
I.7 Erfahrung mit Virtual Reality und Autorennen (Gaming) 142
I.8 Angaben zur Person 142

I Fragebogen für VR-Experiment

I.1 Streckenabschnitte

Nachfolgend sehen Sie die Streckenabschnitte, die Sie auf der Virtual-Reality-Strecke gefahren sind. **Stellen Sie sich vor, Sie fahren die gleiche Strecke in der Realität.** Bitte beurteilen Sie die einzelnen Abschnitte.

Wie schnell würden Sie hier fahren? _____ *km/h*

Welche Geschwindigkeitsbegrenzung würden Sie hier als sicher einstufen? _____ *km/h*

Aus Ihrer Sicht als Autofahrer/in: Wie beurteilen Sie diesen Streckabschnitt?

Sicher	1	2	3	4	5	Unsicher
Einfach	1	2	3	4	5	Komplex

Abb. 1 *Beispiel Streckenabschnitt EK0 Tempo 30*

Alle weiteren Experimentalkonditionen wurden identisch abgefragt.

I.2 Momentanes Wohlbefinden

Bitte geben Sie an, wie stark Sie die folgenden Zustände jetzt im Moment fühlen. Bitte zutreffende Antwort umkreisen.

Allgemeines Unwohlsein

Gar nicht	Etwas	Mittel	Stark
1	2	3	4

Ermüdung

Gar nicht	Etwas	Mittel	Stark
1	2	3	4

Kopfschmerzen

Gar nicht	Etwas	Mittel	Stark
1	2	3	4

Angestrengte Augen

Gar nicht	Etwas	Mittel	Stark
1	2	3	4

Schwierigkeiten, scharf zu sehen

Gar nicht	Etwas	Mittel	Stark
1	2	3	4

Erhöhter Speichelfluss

Gar nicht	Etwas	Mittel	Stark
1	2	3	4

Übelkeit

Gar nicht	Etwas	Mittel	Stark
1	2	3	4

Konzentrationsschwierigkeiten

Gar nicht	Etwas	Mittel	Stark
1	2	3	4

Kopfdruck

Gar nicht	Etwas	Mittel	Stark
1	2	3	4

Verschwommene Sicht

Gar nicht	Etwas	Mittel	Stark
1	2	3	4

Schwindel (Augen offen)

Gar nicht	Etwas	Mittel	Stark
1	2	3	4

Schwindel (Augen zu)

Gar nicht	Etwas	Mittel	Stark
1	2	3	4

Gleichgewichtsstörungen

Gar nicht	Etwas	Mittel	Stark
1	2	3	4

Magen macht sich bemerkbar

Gar nicht	Etwas	Mittel	Stark
1	2	3	4

Aufstossen

Gar nicht	Etwas	Mittel	Stark
1	2	3	4

Schwitzen

Gar nicht	Etwas	Mittel	Stark
1	2	3	4

I.3 Fahrerlebnis in Virtual Reality

Nun folgen einige Fragen dazu, wie Sie das Autofahren in der Virtual-Reality-Umgebung erlebt haben. Bitte zutreffende Antwort umkreisen.

I.3.1 Virtual-Reality-Umgebung

Ich bin in die virtuelle Umgebung eingetaucht.

Stimme überhaupt nicht zu				Stimme voll und ganz zu
1	2	3	4	5

Die visuellen Elemente der Umgebung wirkten natürlich.

Stimme überhaupt nicht zu				Stimme voll und ganz zu
1	2	3	4	5

Das Erlebnis in der virtuellen Umgebung stimmte mit dem Erlebnis in der echten Welt überein.

Stimme überhaupt nicht zu				Stimme voll und ganz zu
1	2	3	4	5

Ich konnte die Elemente in der Umgebung genau anschauen.

Stimme überhaupt nicht zu				Stimme voll und ganz zu
1	2	3	4	5

I.3.2 Fahrerlebnis

Ich konnte beeinflussen, was während der virtuellen Fahrt geschah.

Stimme überhaupt nicht zu				Stimme voll und ganz zu
1	2	3	4	5

Ich hatte das Gefühl, dass der Fahrsimulator auf mein Verhalten reagierte.

Stimme überhaupt nicht zu				Stimme voll und ganz zu
1	2	3	4	5

Das Autofahren in der virtuellen Umgebung fühlte sich natürlich an.

Stimme überhaupt nicht zu				Stimme voll und ganz zu
1	2	3	4	5

Ich konnte die Auswirkungen meines Fahrverhaltens vorhersehen.

Stimme überhaupt nicht zu				Stimme voll und ganz zu
1	2	3	4	5

Meine Handlungen, um die virtuelle Fahrt zu beeinflussen, fühlten sich natürlich an.

Stimme überhaupt nicht zu				Stimme voll und ganz zu
1	2	3	4	5

I.4 Fahrstil

Nun folgen einige Fragen zu Ihrem Fahrstil.

Verstossen Sie gegen die Geschwindigkeitsbegrenzung auf der Autobahn?

Nie / Sehr selten	Selten	Gelegentlich	Oft	Sehr oft / Immer
1	2	3	4	5

Fahren Sie schnell?

Nie / Sehr selten	Selten	Gelegentlich	Oft	Sehr oft / Immer
1	2	3	4	5

Überschreiten Sie die Geschwindigkeitsbegrenzung in bewohnten Gebieten?

Nie / Sehr selten	Selten	Gelegentlich	Oft	Sehr oft / Immer
1	2	3	4	5

Werden Sie nervös, wenn Sie während der Fahrt plötzlichen Gefahren begegnen?

Nie / Sehr selten	Selten	Gelegentlich	Oft	Sehr oft / Immer
1	2	3	4	5

Bleiben Sie ruhig, wenn Geschehnisse sehr schnell passieren und wenig Zeit zum Nachdenken bleibt?

Nie / Sehr selten	Selten	Gelegentlich	Oft	Sehr oft / Immer
1	2	3	4	5

Wird Ihr Fahrverhalten durch den Druck anderer Autofahrer beeinflusst?

Nie / Sehr selten	Selten	Gelegentlich	Oft	Sehr oft / Immer
1	2	3	4	5

Nehmen Sie gerne Ratschläge zu Ihrem Fahrverhalten entgegen?

Nie / Sehr selten	Selten	Gelegentlich	Oft	Sehr oft / Immer
1	2	3	4	5

Haben Sie eine Abneigung gegenüber Menschen, die Ihnen Ratschläge über Ihre Fahrweise geben?

Nie / Sehr selten	Selten	Gelegentlich	Oft	Sehr oft / Immer
1	2	3	4	5

Fahren Sie vorsichtig?

Nie / Sehr selten	Selten	Gelegentlich	Oft	Sehr oft / Immer
1	2	3	4	5

Fällt es Ihnen leicht, Ablenkungen beim Autofahren zu ignorieren?

Nie / Sehr selten	Selten	Gelegentlich	Oft	Sehr oft / Immer
1	2	3	4	5

Ignorieren Sie Mitfahrende, die Sie zu einer Geschwindigkeitsänderung drängen?

Nie / Sehr selten	Selten	Gelegentlich	Oft	Sehr oft / Immer
1	2	3	4	5

Wie oft machen Sie sich auf eine unbekannte Fahrt, ohne zuerst auf eine Karte zu schauen?

Nie / Sehr selten	Selten	Gelegentlich	Oft	Sehr oft / Immer
1	2	3	4	5

Planen Sie lange Reisen im Voraus, einschliesslich Orte, an denen Sie anhalten und sich ausruhen können?

Nie / Sehr selten	Selten	Gelegentlich	Oft	Sehr oft / Immer
1	2	3	4	5

Überholen Sie auf einer zweispurigen Strasse, wenn Sie die Möglichkeit dazu haben?

Nie / Sehr selten	Selten	Gelegentlich	Oft	Sehr oft / Immer
1	2	3	4	5

Überfahren Sie eine Ampel, nachdem sie rot geworden ist?

Nie / Sehr selten	Selten	Gelegentlich	Oft	Sehr oft / Immer
1	2	3	4	5

I.5 Einschätzung Fahrpraxis

Die folgenden Aussagen beziehen sich auf Ihre **allgemeine Fahrpraxis mit dem Auto**. Bitte geben Sie an, wie stark Sie den Aussagen zustimmen. Bitte zutreffende Antwort umkreisen.

Ich fahre sehr gut.

Stimme überhaupt nicht zu				Stimme voll und ganz zu
1	2	3	4	5

Ich fahre selbstsicher.

Stimme überhaupt nicht zu				Stimme voll und ganz zu
1	2	3	4	5

Ich fahre sicher.

Stimme überhaupt nicht zu				Stimme voll und ganz zu
1	2	3	4	5

Ich halte mich an die Verkehrsregeln.

Stimme überhaupt nicht zu				Stimme voll und ganz zu
1	2	3	4	5

Ich bin aufmerksam auf meine Umgebung.

Stimme überhaupt nicht zu				Stimme voll und ganz zu
1	2	3	4	5

Ich passe mein Fahrverhalten an die Situation, z.B. Verkehr oder Wetterbedingung, an.

Stimme überhaupt nicht zu				Stimme voll und ganz zu
1	2	3	4	5

I.6 Fahrpraxis

Seit wann besitzen Sie den Auto-Führerausweis (Kategorie B)? *Seit _ _ _ _*

Wie häufig fahren Sie selber Auto? Bitte zutreffende Antwort ankreuzen.

	Weniger als 1x/Monat	*Monatlich*	*Wöchentlich*	*Mehrmals pro Woche*	*Täglich*
Arbeit / Ausbildung					
Einkaufen					
Freizeit (Wandern, Restaurant, Familienbesuch etc.)					

Wie viele Kilometer sind Sie in den letzten 12 Monaten selber mit dem Auto gefahren (ungefähre Angabe)? …….. Km

Steht Ihnen im Haushalt ein Auto zur Verfügung? Bitte zutreffende Antwort/en umkreisen (Mehrfachauswahl möglich). *Nein, nicht verfügbar. / Ja, via Carsharing-Anbieter. / Ja, nach Absprache verfügbar. / Ja, immer verfügbar.*

Waren Sie jemals in einen Verkehrsunfall involviert (unabhängig davon, ob Sie oder die andere Person verantwortlich war)? Bitte zutreffende Antwort umkreisen. *Ja / Nein*

I.7 Erfahrung mit Virtual Reality und Autorennen (Gaming)

Wie oft nutzen Sie eine Virtual-Reality-Brille? Bitte zutreffende Antwort umkreisen.

Wöchentlich / Monatlich / Seltener / Nie

Wie oft nutzen Sie einen Virtual-Reality-Fahrsimulator? Bitte zutreffende Antwort umkreisen.

Wöchentlich / Monatlich / Seltener / Nie

Wie oft fahren Sie Autorennen mit einer Gaming-Konsole? Bitte zutreffende Antwort umkreisen.

Wöchentlich / Monatlich / Seltener / Nie

I.8 Angaben zur Person

Jahrgang:

Geschlecht:

Abkürzungsverzeichnis

Begriff	Bedeutung
AP	Arbeitspaket
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BFU	Beratungsstelle für Unfallverhütung
DTV	durchschnittlicher Tagesverkehr
EK	experimentelle Kondition
FGSO	farbliche Gestaltung Strassenoberfläche
HMD	Head-Mounted Display
MIV	motorisierter Individualverkehr
MSSQ-Short	Motion Sickness Susceptibility Questionnaire
OSM	OpenStreetMap
PKW	Personenkraftwagen
SER	self-explaining roads
VR	Virtual Reality
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute
AP	Arbeitspaket
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BFU	Beratungsstelle für Unfallverhütung

Literaturverzeichnis

Aarts, L., & van Schagen, I. (2006). Driving speed and the risk of road crashes: A review. *Accident Analysis & Prevention*, *38*(2), 215–224. https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.07.004

Ahie, L. M., Charlton, S. G., & Starkey, N. J. (2015). The role of preference in speed choice. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *30*, 66–73. https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.02.007

Allen, W. R., Rosenthal, T. J., & Cook, M. L. (2017). A Short History of Driving Simulation. In *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine and Psychology: An Overview*. CRC Press.

Ariën, C. (2016). *The effects in distance and time of traffic calming measures near road transitions and discontinuities by means of driving simulator research* [PhD Thesis]. Hasselt University.

Ariën, C., Cornu, J., Brijs, K., Brijs, T., Vanroelen, G., Jongen, E. M. M., Daniels, S., & Wets, G. (2013). Measuring the impact of digital information displays on speed: A driving simulator study. *Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C.

Bennett, C. R., Corey, R. R., Giudice, U., & Giudice, N. A. (2016). Immersive Virtual Reality Simulation as a Tool for Aging and Driving Research. In J. Zhou & G. Salvendy (Hrsg.), *Human Aspects of IT for the Aged Population. Healthy and Active Aging* (Bd. 9755, S. 377–385). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39949-2_36

Bottone, M., & Johnsen, K. (2016). Improving Interaction in HMD-Based Vehicle Simulators through Real Time Object Reconstruction. *Proceedings of the 2016 Symposium on Spatial User Interaction - SUI '16*, 111–120. https://doi.org/10.1145/2983310.2985761

Bundesamt für Strassen (Astra). (2018). *Schwere Unfälle mit Hauptursache Geschwindigkeit im Jahr 2017* (v). Bundesamt für Strassen (Astra). https://www.astra.admin.ch/dam/astra/de/dokumente/unfalldaten/schwere_unfaelleimjahr2015.pdf.download.pdf/schwere_unfaelleimjahr2017.pdf

Cameron, M. H., & Elvik, R. (2010). Nilsson's Power Model connecting speed and road trauma: Applicability by road type and alternative models for urban roads. *Accident Analysis & Prevention*, *42*(6), 1908–1915. https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.05.012

Carsten, O., & Jamson, A. H. (2011). Driving Simulators as Research Tools in Traffic Psychology. In *Handbook of Traffic Psychology* (S. 87–96). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381984-0.10007-4

Charlton, S. G. (2007). The role of attention in horizontal curves: A comparison of advance warning, delineation, and road marking treatments. *Accident Analysis & Prevention*, *39*(5), 873–885. https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.12.007

Charlton, S. G., & Starkey, N. J. (2017). Driving on urban roads: How we come to expect the 'correct' speed. *Accident Analysis & Prevention*, *108*, 251–260. https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.09.010

Chinn, L., & Elliott, M. A. (2002). *The effects of road appearance on perceived safe travel speed: Final report* (PA3828/20). Crowthorne: TRL Limited.

Chowdhury, M. I. (2014). *A User-Centered Approach to Road Design: Blending Distributed Situation Awareness with Self-Explaining Roads*. 276.

Davidse, D. R. J., & van Driel, C. J. G. (2002). *Bronnen voor een meta-analyse van de relatie tussen omgevingskenmerken en verkeersgedrag* (D-2002-6; S. 141). SWOV Institute for Road Safety Research.

de Waard, D., Jessurun, M., Steyvers, F. J. J. M., Reggatt, P. T. F., & Brookhuis, K. A. (1995). Effect of road layout and road environment on driving performance, drivers' physiology and road appreciation. *Ergonomics*, *38*(7), 1395–1407. https://doi.org/10.1080/00140139508925197

Dietiker, J., Bosshard, M., Gottardi, G., Krämer, C., Luchsinger, C., Regli, P., & Zeyer, A. (2009). *Wie Strassenraumbilder den Verkehr beeinflussen* (Forschungsbericht 2004 / 057). Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure (SVI).

Dixon, K., Zhu, H., Ogle, J., & Brooks, J. (2008). *Determining Effective Roadway Design Treatments for Transitioning from Rural Areas to Urban Areas on State Highways* (S. 192).

Dony, L. (2019). *Design and Development of a Research Platform to Compare Driving Simulator Feature Sets*. 140.

Eberling, P. (2013). *Strassenraumgestaltung: Gestaltung von Ortsdurchfahrten für eine höhere Verkehrssicherheit* (bfu-Fachdokumentation 2.048). Beratungsstelle für Unfallverhütung. https://www.bfu.ch/sites/assets/Shop/bfu_2.048.01_bfu-Fachdokumentation%202.048%20–%20Strassenraumgestaltung.pdf

EKLB. (2015). *Tempo 30 als Lärmschutzmassnahme: Grundlagenpapier zu Recht—Akustik—Wirkung*. Eidgenösssiche Kommission für Lärmbekämpfung.

Elliott, M. A., McColl, V. A., & Kennedy, J. V. (2003). *Road design measures to reduce drivers' speed via 'psychological' processes: A literature review* (Nr. TRL564; S. 34). TRL Limited.

Elvik, R. (2013). A re-parameterisation of the Power Model of the relationship between the speed of traffic and the number of accidents and accident victims. *Accident Analysis & Prevention*, *50*, 854–860. https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.07.012

Ewert, U., Scaramuzza, G., NIemann, S., & Walter, E. (2010). *Der Faktor Geschwindigkeit im motorisierten Strassenverkehr* (bfu-Sicherheitsdossier Nr. 6). Beratungsstelle für Unfallverhütung.

FHNW. (2021). *Swiss Building Rules*. https://github.com/fhnw-iit/swiss-building-rules

Finch, D. J., Kompfner, P., Lockwood, C. R., & Maycock, G. A. (1994). *Speed, speed limits and accidents* (TRL Project report PR 58).

Fitzpatrick, K., Carlson, P., Brewer, M., & Wooldridge, M. (2001). Design Factors That Affect Driver Speed on Suburban Streets. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1751*, 18–25. https://doi.org/10.3141/1751-03

French, D. J., West, R. J., Elander, J., & Wilding, J. M. (1993). Decision-making style, driving style, and self-reported involvement in road traffic accidents. *Ergonomics*, *36*(6), 627–644. https://doi.org/10.1080/00140139308967925

Galante, F., Mauriello, F., Montella, A., Pernetti, M., Aria, M., & D'Ambrosio, A. (2010). Traffic calming along rural highways crossing small urban communities: Driving simulator experiment. *Accident Analysis & Prevention*, *42*(6), 1585–1594. https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.03.017

Gargoum, S. A., El-Basyouny, K., & Kim, A. (2016). Towards setting credible speed limits: Identifying factors that affect driver compliance on urban roads. *Accident Analysis & Prevention*, *95*, 138–148. https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.07.001

Gemeente Amsterdam. (2016). *Evaluatie Pilot Sarphatistraat OV-fietsstraat* (Nr. 150258).

Gemeente Hof van Twente. (2016). *Evaluatie eenrichtingsverkeer Molenstraat Goor* (Nr. 605503).

Gemeente Oostzaan. (2019). *Kerkbuurt 30km/u* (Nr. 212381).

Godley, S. T., Triggs, T. J., & Fildes, B. N. (2004). Perceptual lane width, wide perceptual road centre markings and driving speeds. *Ergonomics*, *47*(3), 237–256. https://doi.org/10.1080/00140130310001629711

Goldenbeld, C., Groot-Mesken, J., & Temürhan, M. (2017). *Nudging van rijsnelheid via Dick Bruna-borden: Een veldexperiment* (R-2017-11). SWOV Institute for Road Safety Research.

Goldenbeld, C., & van Schagen, I. (2007). The credibility of speed limits on 80km/h rural roads: The effects of road and person(ality) characteristics. *Accident Analysis & Prevention*, *39*(6), 1121–1130. https://doi.org/10.1016/j.aap.2007.02.012

Golding, J. F. (2006). Predicting individual differences in motion sickness susceptibility by questionnaire. *Personality and Individual Differences*, *41*(2), 237–248. https://doi.org/10.1016/j.paid.2006.01.012

Graf, T., Schweizer, N., Alder, B., Stäheli, A., & Conrad, V. (2017). *Basel Begegnungszonen in Wohnquartieren, Wirkungskontrolle* (S. 123). Bau- und Verkehrsdepartement des Kantons Basel-Stadt.

Grolimund und Partner. (2017). *Grundlagen zur Beurteilung der Lärmwirkung von Tempo 30* (Forschungsbericht VSS 2012/214). Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS.

Häfliger, R., Hubmann, M., Hool, A., Huwer, U., & Kobi, F. (2019). *Tempo 30 auf Hauptverkehrsstrassen – Einsatzgrenzen und Umsetzung* (S. 203) [SVI-Forschungsauftrag 2015/004]. Bundesamt für Strassen.

Hill, J. D., & Salzman, J. A. (2012). Enhancing Speed Perception in Virtual Environments Through Training. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *56*(1), 1772–1776. https://doi.org/10.1177/1071181312561356

Jerald, J. (2016). *The VR book: Human-centered design for virtual reality* (First edition). Morgan & Claypool.

Johnson, L., & Nedzesky, A. J. (2004). A Comparative Study of Speed Humps, Speed Slots and Speed Cushions. *ITE Annual Meeting*, 14.

Kaptein, N., Theeuwes, J., & Van Der Horst, R. (1996). Driving Simulator Validity: Some Considerations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1550*, 30–36. https://doi.org/10.3141/1550-05

Kaufmann, K. (2017). *Fussgängererkennung im virtuellen Raum. Gestaltung und Validierung eines Fahrsimulators.* Fachhochschule Nordwestschweiz.

Kemeny, A. (2014). *From driving simulation to virtual reality*. 1–5. https://doi.org/10.1145/2617841.2620721

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

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

Kronqvist, A., Jokinen, J., & Rousi, R. (2016). Evaluating the Authenticity of Virtual Environments: Comparison of Three Devices. *Advances in Human-Computer Interaction*, *2016*, 1–14. https://doi.org/10.1155/2016/2937632

Layfield, R. E., & Parry, D. I. (1998). *Traffic calming—Speed cushion schemes* (TRL Report 312). Transport Research Laboratory.

Lee, H. C., Cameron, D., & Lee, A. H. (2003). Assessing the driving performance of older adult drivers: On-road versus simulated driving. *Accident Analysis & Prevention*, *35*(5), 797–803. https://doi.org/10.1016/S0001-4575(02)00083-0

Lee, H. C., Lee, A. H., Cameron, D., & Li-Tsang, C. (2003). Using a driving simulator to identify older drivers at inflated risk of motor vehicle crashes. *Journal of Safety Research*, *34*(4), 453–459. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2003.09.007

Lindenmann, H.-P., & Koy, T. (2000). *Beurteilung der Auswirkungen von Zonensignalisationen (Tempo 30) in Wohngebieten auf die Verkehrssicherheit* (Fonds für Verkehrssicherheit). IVT ETH Zürich.

Lindenmann, H.-P., & Leeman, N. (2008). *Quantifizierung von Sicherheitsdefiziten* -. Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme.

Mackie, H. W. (2013). Road user behaviour changes following a self-explaining roads intervention. *Accident Analysis and Prevention*, 9.

Martens, M., Comte, S., & Kaptein, N. (1997). *The Effects of Road Design on Speed Behaviour: A Literature Review. Deliverable D1 (Report 2.3.1)*. TNO Human Factors Research Institute.

Molino, J. (2009). *Simulator Evaluation of Low-Cost Safety Improvements on Rural Two-Lane Undivided Roads: Nighttime Delineation for Curves and Traffic Calming for Small Towns* (FHWA-HRT-09-062). Federal Highway Administration.

Montella, A., & Mauriello, F. (2011). Drivers' Speed Behaviour At Rural Intersections: Simulator Experiment And Real World Monitoring. *Road Safety and Simulation*, 1–14.

Niemann, S. (2020). *Geschwindigkeit auf Schweizer Strassen* (2.378). bfu. https://www.bfu.ch/api/publications/bfu_2.378.01_geschwindigkeit%20auf%20schweizer%20strassen%20%E2%80%93%20pilotprojekt%20zur%20erhebung%20des%20geschwindigkeitsverhaltens%20von%20motorfahr.pdf

Pestalozzi & Stäheli. (2017). *Basel Begegnungszonen in Wohnquartieren, Wirkungskontrolle*. https://begegnungszonen.ch/wp-content/uploads/2018/01/Bericht-Wirkungskontrolle-Begegnungszonen-in-Wohnquartieren.pdf

Quimby, A., Maycock, G., Palmer, C., & Buttress, S. (1998). *The factors that influence a driver's choice of speed—A questionnaire study* (TRL Report 325). Transport Research Laboratory.

Rangelova, S., Motus, D., & André, E. (2020). Cybersickness Among Gamers: An Online Survey. In T. Ahram (Hrsg.), *Advances in Human Factors in Wearable Technologies and Game Design* (S. 192–201). Springer International Publishing.

Reagan, I. J., Bliss, J. P., Van Houten, R., & Hilton, B. W. (2013). The Effects of External Motivation and Real-Time Automated Feedback on Speeding Behavior in a Naturalistic

Setting. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *55*(1), 218–230. https://doi.org/10.1177/0018720812447812

Ricaud, B., Lietar, R., & Joly, C. (2015). Are Virtual Reality headsets efficient for remote driving? In *Proceedings of the International Conference on Road Safety & Simulation 2015* (S. 804–815).

Sadia, R., Bekhor, S., & Polus, A. (2018). Speed variation for different drivers, situations, and road geometry: Simulator and survey analysis. *Journal of Transportation Safety & Security*, *10*(1–2), 25–44. https://doi.org/10.1080/19439962.2016.1275071

Scaramuzza, G., Degener, S., & Allenbach, R. (2016). *SERFOR: Voranalyse «Self Explaining and Forgiving Roads»* (VSS 2012/311; Forschungsberict). Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS).

Schüller, H., Balmberger, M., Straumann, R., & Ulmer, M. (2014). *Einflüsse von Situation und Infrastruktur auf das Unfallgeschehen: Phase 1* (Forschungsbericht Nr. 1454; Forschungspaket VeSPA). Bundesamt für Strassen.

Schwarz, R., Ströhle, M., & Bayer, R. (2010). *Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmimmissionen* (Forschungsbericht VSS 2000/467; S. 102). Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS.

Shechtman, O., Classen, S., Awadzi, K., & Mann, W. (2009). Comparison of Driving Errors Between On-the-Road and Simulated Driving Assessment: A Validation Study. *Traffic Injury Prevention*, *10*(4), 379–385. https://doi.org/10.1080/15389580902894989

Slater, M., Lotto, B., Arnold, M. M., & Sanchez-Vives, M. V. (2009). How we experience immersive virtual environments: The concept of presence and its measurement. *Anuario de Psicología*, *40*, 18.

Steiner, R., Zehnder, C., Dubuis, A., Grünauer, C., Fässler, J., Matter, J., Bessire, K., & Albisser, R. (2013). *Begegnungszonen eine Werkschau mit Empfehlungen für die Realisierung* (Forschungsbericht Nr. 2016/002). Vereinigung Schweizerischer Verkehrsingenieure (SVI).

Stoner, H. A., Fisher, D. L., & Mollenhauer, M. (2011). Simulator and Scenario Factors Influencing Simulator Sickness. In J. Lee, D. L. Fisher, J. K. Caird, & M. Rizzo (Hrsg.), *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/b10836-2

Taylor, M. C., Crinson, L. F., & Osborn, R. E. (2002). *An assessment of traffic calming for trunk roads using the TRL driving simulator*. 28.

Theeuwes, J., & Godthelp, H. (1995). Self-explaining roads. *Safety Science*, *19*(2–3), 217–225. https://doi.org/10.1016/0925-7535(94)00022-U

Theeuwes, J., & Horst, R. van der. (2017). *Designing Safe Road Systems: A Human Factors Perspective*.

Thompson, W. B., Willemsen, P., Gooch, A. A., Creem-Regehr, S. H., Loomis, J. M., & Beall, A. C. (2004). Does the Quality of the Computer Graphics Matter when Judging Distances in Visually Immersive Environments? *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *13*(5), 560–571. https://doi.org/10.1162/1054746042545292

Tiefbauamt des Kantons Bern. (2010). *Zufrieden mit dem neuen Zentrum?* Tiefbauamt des Kantons Bern.

Ullman, G. L., & Rose, E. R. (2005). Evaluation of Dynamic Speed Display Signs. *Transportation Research Record*, *1918*, 92–97.

Van Houten, R., Nau, P., & Marini, Z. (1980). An analysis of public posting in reducing speeding behavior on an urban highway. *Journal of Applied Behavior Analysis*, *13*(3), 383–395.

Victoir, A., Eertmans, A., den Bergh, O. V., & den Broucke, S. V. (2005). Learning to drive safely: Social-cognitive responses are predictive of performance rated by novice drivers and their instructors. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *8*(1), 59–74. https://doi.org/10.1016/j.trf.2005.01.002

VSS. (2019a). *VSS 40 214 Entwurf des Strassenraums; Farbliche Gestaltung von Strassenoberflächen*.

VSS. (2019b). *VSS 40 215 Entwurf des Strassenraums—Mehrzweckstreifen* [Norm]. VSS.

Walch, M., Frommel, J., Rogers, K., Schüssel, F., Hock, P., Dobbelstein, D., & Weber, M. (2017). *Evaluating VR Driving Simulation from a Player Experience Perspective*. 2982–2989. https://doi.org/10.1145/3027063.3053202

Walter, L., & Broughton, J. (2011). Effectiveness of speed indicator devices: An observational study in South London. *Accident Analysis & Prevention*, *43*(4), 1355–1358. https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.02.008

Wang, F., Chen, Y., Guo, J., Yu, C., Stevenson, M., & Zhao, H. (2019). Middle-aged Drivers' subjective categorization for combined alignments on mountainous freeways and their speed choices. *Accident Analysis & Prevention*, *127*, 80–86. https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.02.020

Wasserman, D. (2021). *Complete Streets Rule*. https://github.com/d-wasserman/Complete_Street_Rule

Weech, S., Kenny, S., & Barnett-Cowan, M. (2019). Presence and Cybersickness in Virtual Reality Are Negatively Related: A Review. *Frontiers in Psychology*, *10*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00158

Weidner, F., Hoesch, A., Poeschl, S., & Broll, W. (2017). *Comparing VR and non-VR driving simulations: An experimental user study*. 281–282. https://doi.org/10.1109/VR.2017.7892286

Wessels, H., & Groff, A. (2013). *Weitere Umsetzung von Tempo 30 in Basel*. Städtekonferenz Mobilität, Basel.

Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence: Teleoperators and virtual environments*, *7*(3), 225–240.

Wrapson, W., Harré, N., & Murrell, P. (2006). Reductions in driver speed using posted feedback of speeding information: Social comparison or implied surveillance? *Accident Analysis & Prevention*, *38*(6), 1119–1126. https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.04.021

Wynne, R. A., Beanland, V., & Salmon, P. M. (2019). Systematic review of driving simulator validation studies. *Safety Science*, *117*, 138–151. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.04.004

Ziemer, C. J., Plumert, J. M., Cremer, J. F., & Kearney, J. K. (2009). Estimating distance in real and virtual environments: Does order make a difference? *Attention, Perception, & Psychophysics*, *71*(5), 1095–1106. https://doi.org/10.3758/APP.71.5.1096

Projektabschluss

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 28. Januar

Grunddaten

Projekt-Nr.:	SVI 2018/001
Projekttitel:	**Quantifizierung der Wirkung von Elementen des Strassenraumes auf die gefahrene Geschwindigkeit**
Enddatum:	31. August 2022

Texte

Zusammenfassung der Projektresultate:

Die Forschungsarbeit leistet einen Beitrag für ein besseres Verständnis der Wirkung von einzelnen Gestaltungselementen auf die gefahrene Geschwindigkeit. Differenziert nach Strassentypen innerorts und ausserorts lassen sich die folgenden Ergebnisse festhalten: Innerorts zeigen ausgewählte Gestaltungselemente einen kleinen, aber quantifizierbaren und statistisch relevanten Einfluss auf die gefahrene Geschwindigkeit. Beispielsweise führt eine geringere Fahrstreifenbreite gemäss Messungen im Feld nachweislich zu einer Reduktion der Geschwindigkeit. Bei anderen untersuchten Gestaltungselementen innerorts zeigen sich widersprüchliche Effekte zwischen Messungen im Feld, den Messungen sowie den subjektiven Befragungsdaten aus der VR-Fahrsimulator-Studie. Zum Beispiel wird auf Basis den Messungen bei Parkplätzen langsamer gefahren und die Probanden geben an, langsamer zu fahren, wenn es Parkplätze gibt. Dieser Effekt zeigt sich aber nicht auf Basis der VR Fahrsimulator-Studie. Widersprüchlichen Effekte zeigen sich bei Gestaltungselementen bei denen dynamische Faktoren wie Fussverkehrsaufkommen oder Veloverkehrsaufkommen mit der Wirkung der Gestaltungselemente interagieren. Die Studie zeigt damit, dass die Wirkung der Gestaltungselemente auf die gefahrene Geschwindigkeit innerorts nicht an der Wirkung einzelner Elemente des Strassenraums festgemacht werden kann. Weiter konnten in der vorliegenden Studie Hinweise auf die Wirkungsmechanismen der Gestaltungselemente (wahrgenommene Risiken oder Komplexität) gewonnen werden. Daraus lässt sich die These ableiten, dass für eine Quantifizierung der Wirkung von Gestaltungselementen auf die Geschwindigkeitswahl Interaktionen mit dynamischen Humanfaktoren zu berücksichtigen sind. Ausserorts konnte auf Basis der VR-Fahrsimulator-Studie mit den untersuchten neuen Gestaltungselementen eine kleine und konsistente quantifizierbare Wirkung auf die gefahrene Geschwindigkeit belegt werden. Einen in der vorliegenden Studie nachweislichen Effekt auf die Geschwindigkeitswahl nehmen die folgenden Gestaltungselemente: ein breites Band, ein breites Band in Kombination mit einem Trennstreifen mit Muster sowie eine fehlende Leitlinie.

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Mit dem Projekt konnten die Forschungsfragen mehrheitlich beantwortet und die Forschungsziele erreicht werden.

Folgende Einschränkungen sind zu berücksichtigen: Eine Quantifizierung der Wirkung konnte aufgrund der verwendeten Methodik nur für einen ausgewählten Anteil von Gestaltungselementen untersucht werden.

Folgerungen und Empfehlungen:

Folgende Empfehlungen lassen sich aus diesen Ergebnissen ableiten: In der aktuellen Schweizer Strassengestaltung innerorts kommt den untersuchten Gestaltungselementen mit widersprüchlicher Wirkung (Parkplätze, Radstreifen, Mehrzweckstreifen) aus unterschiedlichen Gründen eine grosse Bedeutung zu. Darum gilt es in zusätzlicher Forschung zu ergründen, wie die Anwesenheit von anderen Verkehrsteilnehmern (Velofahrende, Fussgängerinnen und Fussgänger) auf die Geschwindigkeitswahl Einfluss nehmen.
Weiter gilt es, in zukünftiger Forschung die Wirkung von Kombinationen zu untersuchen. Ausserorts gibt die vorliegende Forschungsarbeit die Grundlage für erfolgsversprechende Gestaltungsmassnahmen, welche wirkungsvoll zu einer Temporeduktion eingesetzt werden. Die Wirkung dieser bisher noch nicht-existierenden Gestaltungsmerkmale in Tempo 80 km/h

Publikationen:

Unfälle vermeiden – wie sich durch die Gestaltung des Strassenraums das Fahrtempo reduzieren lässt
eMagazin FHNW - https://emagazin.fhnw.ch/unfaelle-vermeiden-wie-sich-durch-die-gestaltung-des-strassenraums-das-fahrtempo-reduzieren-laesst/

Schaffner, D.; Van Eggermond, M. & Studer, N. (2022). Self-explaining Roads: Influence of Road Design on Perceptions and Speed Choice. 7th International Conference on Traffic and Transportation Psychology, Gothenburg, Sweden.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Schaffner Vorname: Dorothea

Amt, Firma, Institut: Hochschule für Angewandte Psychologie, Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Forschungsarbeit stellt eine weitere Etappe dar auf dem Weg zum Verständnis der Wirkung von verschiedenen Strassenraumgestaltungen auf die gefahrene Geschwindigkeit. Die Studie ist methodisch sauber erarbeitet worden und zeigt nachvollziehbar auf, welche Ergebnisse (auch divergierende Ergebnisse) bei den verschiedenen Methoden (u.a. VR-Fahrsimulatorexperimente) resultierten.
In der Studie wurden nicht nur übliche Massnahmen getestet, sondern auch neue Ansätze. Die Forschungsarbeit hat die Ziele (v.a. die Beantwortung der Forschungsfrage "Welche Gestaltungselemente des Schweizer Strassenraumes beeinflussen die Geschwindigkeitswahl für verschiedene Strassentypen am effektivsten?") aus klar beschriebenen Gründen nicht ganz erreichen können.

Umsetzung:

Die Ergebnisse können die Basis sein für weitere Vertiefungen, insbesondere für die Erforschung des Einflusses der anderen Verkehrsteilnehmer, des Einflusses von anderen Massnahmen sowie der Kombination von verschiedenen Massnahmen auf das Geschwindigkeitsverhalten. Ferner könnte es sich lohnen, die erfolgsversprechenden neuartigen Gestaltungsmassnahmen ausserorts in Pilotversuchen zu testen und zu konkretisieren. Der Bericht liefert Stoff für eine Präsentation und Diskussion an einer nächsten Forschungstagung ASTRA/SVI.

weitergehender Forschungsbedarf:

Einfluss der Anwesenheit von anderen Verkehrsteilnehmern (Velofahrende, Fussgängerinnen und Fussgänger) auf die Geschwindigkeitswahl
Pilotversuche für noch nicht-existierende, erfolgsversprechende Gestaltungsmerkmale

Einfluss auf Normenwerk:

Die Forschungsarbeit hat keinen direkten Einfluss auf das Normenwerk.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Gloor Vorname: Urs

Amt, Firma, Institut: Transitec Beratende Ingenieure, Bern / Lausanne / Genf

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

U. Gloor