

Kriterien

zur sicherheitstechnischen Bewertung

von Kreisverkehren außerorts

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der KIT-Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften

des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Sebastian Schweiger

aus Kehl-Kork

Tag der mündlichen Prüfung: 27. Januar 2023

Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c Ralf Roos

Korreferentin: Univ.-Prof.'in Dr.-Ing. Kerstin Lemke

Karlsruhe (2023)



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-NC-SA 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.de>

Vorwort

Diese Arbeit entstand über einen langen Zeitraum hin: Von der ersten Idee während einer Zugfahrt bis zur Finalisierung vergingen mehrere Jahre. Den Anfang und die wichtigsten inhaltlichen Etappen bewerkstelligte ich während meiner Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen (ISE) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), die finalen Schritte parallel zu meiner anschließenden beruflichen Tätigkeit in der Landesverwaltung Baden-Württemberg.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Ralf Roos gebührt mein umfassender Dank für die Unterstützung meines frei gewählten Themas und die Finanzierung aus Eigenmitteln des Instituts. Darüber hinaus bin ich ihm für die einmalige Zeit in der Institutsgemeinschaft am ISE sowie die sehr gute, sowohl fördernde als auch fordernde Betreuung bei der nicht immer einfachen und gleichzeitig etwas langwierigen Erstellung dieser Arbeit sehr dankbar.

Frau Univ.-Prof.'in Dr.-Ing. Kerstin Lemke, Inhaberin des Lehrstuhls für Verkehrsplanung und Mobilität der Universität Siegen, danke ich sehr herzlich für die Übernahme des Korreferates.

Herrn Dr.-Ing. Matthias Zimmermann darf ich für die immer wertvolle Hilfestellung bei fachlichen Fragen, die umfassende Unterstützung bei Auswerteprogrammierungen sowie ganz besonders für die Bereitschaft danken, bei Bedarf von den unterschiedlichsten Breitengraden aus mit Rat und Tat zur Seite zu stehen – während meiner Tätigkeit am Institut und auch in der Zeit danach. Weiterhin danke ich Herrn Dr.-Ing. Leitloff vom Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung am KIT für die Unterstützung rund um die Videoerhebung sowie Herrn Prof. Dr. Heller vom Lehrstuhl für Statistische Methoden und Ökonometrie am KIT für die Beratung zu statistischen Fragestellungen.

Stellvertretend für alle (ehemaligen) Kollegen und wissenschaftlichen Hilfskräfte am ISE danke ich Dr.-Ing. Barbara Köhler-Laufer für den steten, positiven Ansporn zur Erstellung dieser Arbeit, Nikolaos Rousiamanis M.Sc. für den sprachlichen Feinschliff der Englischübersetzung sowie dem Team um Anton Köhler für die kompetente Durchführung der Videoerhebungen.

Weiterhin danke ich ganz besonders meinen Eltern Ingrid und Ernst, die mir ein sorgenfreies Studium und somit diese Arbeit grundsätzlich erst ermöglicht haben. Einen wesentlichen Anteil am Gelingen hat nicht zuletzt meine Freundin Johanna – sie lernte mich 2019 mit einer „fast fertigen“ Dissertation im Gepäck kennen, unterstützte mich bei der dann zumeist in unserer gemeinsamen Freizeit stattfindenden Weiterarbeit und ermöglichte, dass ich diese Arbeit zu einem positiven Ende bringen konnte – Danke!

Karlsruhe, im Dezember 2023

Sebastian Schweiger

Kurzfassung

Seit etwas mehr als zwei Jahrzehnten findet der Kreisverkehr in Deutschland mit dem Ziel einer Erhöhung der Verkehrssicherheit verstärkte Anwendung. Analysen und Erfahrungen belegen die sicherheitsfördernde Wirkung, da an Kreisverkehren deutlich weniger Unfälle mit schweren Folgen als an vergleichbaren Knotenpunktarten zu verzeichnen sind.

Dennoch geschehen an Kreisverkehren nach wie vor Unfälle; üblicherweise sind dies Fahrunfälle oder Einbiegen-Kreuzen-Unfälle, die sich auf die Zu- und Einfahrbereiche von Kreisverkehren konzentrieren – und gerade dort sind durch das Zusammenspiel vieler Entwurfselemente von Kreisverkehren im Rahmen des Technischen Regelwerks die relativ größten Freiheiten möglich. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Fragestellung, welche Zusammenhänge zwischen Unfallmustern an Kreisverkehren, entwurfsgeometrischen Konstellationen im Bereich der Zu- und Einfahrt von Kreisverkehren sowie dem dadurch hervorgerufenen Fahrverhalten bestehen.

Eine zufahrtsgenaue Unfallanalyse zeigt im ersten Teil der Arbeit auf, dass die Unfallkennwerte an den einzelnen Zufahrten sehr stark durch einen bestimmten Unfalltyp geprägt sind; somit ist es wahrscheinlich, dass die Unfälle dort durch jeweils spezifische Ursachen hervorgerufen werden.

Durch Überlagerung von Geometrie- und Unfalldaten werden drei unfallbegünstigende Situationen identifiziert, die jeweils deutliche Querbezüge zum Fahrverhalten aufweisen. Daraufhin wird eine Methode entwickelt und angewendet, um an fünf ausgewählten Kreisverkehren das Fahrverhalten vertiefend zu untersuchen. Insbesondere für das Geschwindigkeitsverhalten im Bereich der unmittelbaren Zufahrt können Zusammenhänge mit der Geometrie aufgezeigt und weiterhin Zusammenhänge von Fahrverhalten und Unfallgeschehen identifiziert werden: So führen z.B. Zufahrtsgeschwindigkeiten von über 35 km/h tendenziell zu sehr hohen Unfallkennwerten für Einbiegen-Kreuzen-Unfälle.

Mit dem Ziel einer sicherheitstechnischen Bewertungsgrundlage sowohl für geplante als auch für bestehende Kreisverkehre werden zwei Prüfparameter entwickelt, mit denen bewertet werden kann, ob in zwei relevanten Bereichen des Kreisverkehrs die dortige entwurfsgeometrische Konstellation ein aus sicherheitstechnischer Sicht geeignetes Fahrverhalten bewirkt:

- Prüfparameter TE im Bereich der Einfahrt
- Prüfparameter 2T im Bereich der Kreisfahrbahn

Die spezifischen Wertebereiche, die für beide Prüfparameter empfohlen sind, werden mit Hilfe einer wahrscheinlichkeitsbasierten Risikobetrachtung validiert. Werden diese Werte an allen Zufahrten eingehalten, so kann auf der Grundlage der hier vorgenommenen Untersuchungen

davon ausgegangen werden, dass ein hohes Sicherheitsniveau für den Kreisverkehr insgesamt – insbesondere in Bezug auf die häufigsten Unfalltypen Fahrrunfall und Einbiegen-Kreuzen-Unfall – gegeben ist. Abschließend werden für die Prüfparameter hinsichtlich eines praxistauglichen Einsatzes Empfehlungen, die mit dem geltenden Entwurfsregelwerk abgestimmt sind, ausgesprochen. Dabei wurde auch über das Regelwerk hinaus in einer ersten Näherung geprüft, ob durch „unrund“ gestaltete Kreisverkehrselemente eine sicherheitstechnische Verbesserung erreicht werden kann; hierzu bleiben aber belastbare Erkenntnisse weiteren Untersuchungen vorbehalten.

Abstract

In the last two decades, roundabouts have increasingly been constructed in Germany with the aim of improving road safety. Analyses and experience prove this safety-promoting effect, as there are noticeably fewer severe accidents at roundabouts than at comparable types of intersections.

Despite this, accidents still occur at roundabouts. These are mostly either driving accidents or entering-collision accidents, which usually take place in the approach and entry areas of roundabouts – and they are precisely these areas, that can be designed in many different ways, due to the wide value range of the respective design parameters in the technical regulations. The present dissertation investigates the possible interaction between accident patterns at roundabouts, geometric design parameters in the approach and entry areas and the resulting driving behaviour.

In the first part, an analysis of the accidents that took place in various roundabout approach areas shows that the accident characteristics in each approach area are typical for a certain type of accident. It is therefore likely, that the accidents there have common causes in each case.

By superimposing geometry and accident data, three accident-causing situations are identified, each with obvious cross-references to driving behaviour. Subsequently, a method is developed for a more detailed investigation of the driving behaviour, and then applied to five selected roundabouts. Especially for speed behaviour in the area of the immediate approach, correlations with the geometry are proved, and further correlations between driving behaviour and accident occurrence were identified: For example, approach speeds of over 35 km/h tend to lead to very high accident characteristic values for entering-collision accidents.

In an attempt to establish a basis for a safety-related evaluation for both planned and existing roundabouts, two so-called test parameters are developed, in order to evaluate whether the applied geometric design parameters result in safe driving behaviours in the approach and entry areas of roundabouts:

- Test parameter TE in the entry area
- Test parameter 2T in the circulatory lane area

The specific value ranges recommended for both test parameters are validated using a probability-based risk assessment. If these parameters are located within the recommended range at all approaches, it can be assumed, based on the investigations carried out, that a high level of safety is provided for the roundabout as a whole – especially in regards to the most frequent accident types, namely driving and entering-collision accidents. Finally, recommendations are

made for the practical use of these test parameters, which are also in compliance with the current german design regulations. In a first approximation step beyond these regulations, it was furthermore examined, whether "non-circular" roundabout elements can improve safety. However, reliable findings in regards to this, remain subject for further investigations.

Inhalt

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung..... | 14 |
| 1.1 | Anlass und Ziel..... | 14 |
| 1.2 | Begriffshinweise | 15 |
| 2 | Stand der Technik | 17 |
| 2.1 | Anforderungen an den Entwurf kleiner Kreisverkehre in Deutschland | 17 |
| 2.1.1 | Entwicklung der Entwurfsregelwerke und ihres Sicherheitsgedankens..... | 17 |
| 2.1.2 | Betrachtung ausgewählter Entwurfsgrößen und -elemente | 18 |
| 2.1.3 | Fazit zu entwurfsgeometrischen Anforderungen in Deutschland | 21 |
| 2.2 | Anforderungen an den Entwurf kleiner Kreisverkehre im Ausland | 22 |
| 2.2.1 | Überblick und Auswahl bestimmter Länder | 22 |
| 2.2.2 | Schweiz..... | 22 |
| 2.2.3 | Frankreich | 24 |
| 2.2.4 | Niederlande..... | 25 |
| 2.2.5 | Fazit zu entwurfsgeometrischen Anforderungen im Ausland und Vergleich zu Deutschland..... | 27 |
| 2.3 | Literaturübersicht zu Unfalluntersuchungen an Kreisverkehren..... | 28 |
| 2.3.1 | Grundlagen zum Unfallgeschehen an Kreisverkehren..... | 28 |
| 2.3.2 | Vergleichende Unfalluntersuchungen in Deutschland..... | 29 |
| 2.3.3 | Makroskopische Untersuchungen | 31 |
| 2.3.4 | Mikroskopische Untersuchungen zum Unfallgeschehen an Kreisverkehren | 34 |
| 2.3.5 | Unfallfolgen | 35 |
| 2.4 | Statistische Untersuchungen zu Unfallgeschehen und Entwurf | 36 |
| 2.5 | Fazit zu Entwurfskriterien und Unfallgeschehen | 37 |
| 2.6 | Weiterführende Überlegungen | 39 |
| 2.6.1 | Einflüsse aus den Fahrrelationen | 39 |
| 2.6.2 | Einflüsse aus den Zufahrten..... | 40 |
| 2.6.3 | Untersuchungsrandbedingungen..... | 41 |
| 2.7 | Fazit für die folgenden Untersuchungsschritte..... | 42 |
| 3 | Untersuchungsdesign | 43 |
| 3.1 | Methode der Unfalluntersuchung (Kapitel 4) | 43 |
| 3.2 | Methode der Fahrlinienuntersuchung (Kapitel 5) | 44 |
| 3.2.1 | Allgemeines | 44 |
| 3.2.2 | Gewählte Technik der luftgestützten Videodatenerhebung..... | 44 |
| 3.2.3 | Erzeugen von Fahrzeugtrajektorien und weitere Datenverarbeitung | 45 |
| 4 | Zufahrtsgenaue Unfalluntersuchung an Kreisverkehren | 46 |
| 4.1 | Allgemeines | 46 |
| 4.2 | Verkehrliche Eingangsgrößen | 47 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.2.1 | Auswahl von Kreisverkehren | 47 |
| 4.2.2 | Unfalldaten – Zuordnung und Bildung von Kollektiven..... | 48 |
| 4.2.3 | Bestimmung geeigneter Unfallkostensätze..... | 48 |
| 4.3 | Entwurfsgeometrische Eingangsgrößen | 50 |
| 4.3.1 | Allgemeines | 50 |
| 4.3.2 | Diskussion der verwendeten entwurfsgeometrischen Eingangsgrößen | 50 |
| 4.3.3 | Zwischenfazit | 58 |
| 4.4 | Zufahrtsgenaue Unfalluntersuchung am Kollektiv 1.2..... | 59 |
| 4.4.1 | Allgemeines zum Kollektiv 1.2..... | 59 |
| 4.4.2 | Makroskopischer Überblick über das Unfallgeschehen | 59 |
| 4.4.3 | Zufahrtsgenaue Unfallkosten..... | 61 |
| 4.4.4 | Mikroskopische Unfalluntersuchungen | 62 |
| 4.4.5 | Zwischenfazit | 65 |
| 4.5 | Zufahrtsgenaue Unfalluntersuchung am Kollektiv 1.3..... | 66 |
| 4.5.1 | Allgemeines zum Kollektiv 1.3..... | 66 |
| 4.5.2 | Unfallraten und Unfallkostenraten | 66 |
| 4.5.3 | Zwischenfazit | 69 |
| 4.6 | Zusammenhänge von Unfallgeschehen und Entwurfsgeometrie | 69 |
| 4.6.1 | Veranlassung und Datengrundlage | 69 |
| 4.6.2 | Vorbedingungen und Modelldesign der statistischen Auswertung | 69 |
| 4.6.3 | Regressionsanalyse über einzelne Geometriekenngößen (Stufe 1) | 70 |
| 4.6.4 | Regressionsanalyse der Unfallkenngößen (Stufe 2)..... | 72 |
| 4.6.5 | Erkenntnisse aus den unfalldatenbasierten Regressionsanalysen | 73 |
| 4.6.6 | Zwischenfazit: Unfallbegünstigende Risiko-Entwurfs-Konstellationen | 75 |
| 5 | Fahrverhaltensuntersuchung an ausgewählten Kreisverkehren | 77 |
| 5.1 | Methode | 77 |
| 5.2 | Auswahl, Erhebung und Datengenerierung | 77 |
| 5.2.1 | Auswahlkriterien..... | 77 |
| 5.2.2 | Luftgestützte Erhebung | 78 |
| 5.2.3 | Technische Umsetzung der Datengenerierung..... | 79 |
| 5.3 | Diskussion von Fahrlinieneigenschaften zur Eingrenzung des Untersuchungsumfanges | 80 |
| 5.3.1 | Allgemeines | 80 |
| 5.3.2 | Identifikation aussagekräftiger Fahrlinien | 80 |
| 5.3.3 | Geschwindigkeits- und Verzögerungsverhalten..... | 82 |
| 5.3.4 | Zu- und Einfahrverhalten in den Kreisverkehr..... | 87 |
| 5.3.5 | Ermittlung und Diskussion geeigneter Bezugspunkte | 89 |
| 5.3.6 | Zusammenfassung relevanter Untersuchungsinhalte | 91 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.4 | Analyse des Fahrverhaltens auf Basis des Geschwindigkeitsverhaltens | 92 |
| 5.4.1 | Geschwindigkeitsverhalten allgemein..... | 92 |
| 5.4.2 | Geschwindigkeitsverhalten und Geometrie | 93 |
| 5.4.3 | Geschwindigkeitsverhalten und Lenkverhalten..... | 95 |
| 5.4.4 | Geschwindigkeits- und Lenkverhalten auf der Kreisfahrbahn | 98 |
| 5.4.5 | Geschwindigkeitsverhalten und Unfälle..... | 100 |
| 5.4.6 | Fazit zum Fahr- und Geschwindigkeitsverhalten | 105 |
| 5.5 | Herleitung von Prüfparametern für das Geschwindigkeitsverhalten..... | 107 |
| 5.5.1 | Anforderungen und Ansätze..... | 107 |
| 5.5.2 | Prüfparameter im Bereich der Einfahrt (TE) | 108 |
| 5.5.3 | Prüfparameter im Bereich der Kreisfahrbahn (2T) | 110 |
| 5.5.4 | Fazit zu den Prüfparametern..... | 113 |
| 6 | Bewertungshintergrund für die Prüfparameter TE und 2T..... | 114 |
| 6.1 | Vorgehen und Begründung | 114 |
| 6.1.1 | Vorgehen | 114 |
| 6.1.2 | Begründung | 114 |
| 6.2 | Methode zur Validierung als Risikountersuchung | 115 |
| 6.2.1 | Allgemeines | 115 |
| 6.2.2 | Herleitung der Validierungsmethode | 115 |
| 6.2.3 | Durchführung der Validierungsuntersuchung | 117 |
| 7 | Aufstellen und Überprüfen von Anforderungen an die Prüfparameter | 120 |
| 7.1 | Vermeiden von Fahrunfällen | 120 |
| 7.1.1 | Anforderungen zum Vermeiden von Fahrunfällen | 120 |
| 7.1.2 | Überprüfen der Anforderungen..... | 121 |
| 7.2 | Vermeiden von EK-Unfällen – Beitrag des Unfallverursachers | 122 |
| 7.2.1 | Anforderungen zu EK-Unfällen – Beitrag des Unfallverursachers..... | 122 |
| 7.2.2 | Überprüfen der Anforderungen..... | 123 |
| 7.3 | Vermeiden von EK-Unfällen – Beitrag des Unfallbeteiligten 02 | 125 |
| 7.3.1 | Anforderungen zu EK-Unfällen – Beitrag des Unfallbeteiligten 02 | 125 |
| 7.3.2 | Überprüfen der Anforderungen..... | 125 |
| 7.4 | Diskussion der Ergebnisse | 126 |
| 7.4.1 | Überblick..... | 126 |
| 7.4.2 | Zusammenführen der Anforderungen an Winkel TE..... | 127 |
| 7.4.3 | Zusammenführen der Anforderungen an Winkel 2T | 130 |
| 7.4.4 | Sensitivitätsbetrachtungen | 131 |
| 7.5 | Fazit zu den Prüfkriterien | 134 |
| 8 | Folgen der Prüfkriterien für den Kreisverkehrsentwurf..... | 135 |
| 8.1 | Allgemeines | 135 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 8.2 | Anwendung an vierarmigen Kreisverkehren | 135 |
| 8.2.1 | Vergleichsgrundlagen für regelmäßige Entwurfssituationen | 135 |
| 8.2.2 | Diskussion tolerierbarer Abweichungen..... | 139 |
| 8.2.3 | Kreisverkehre mit variablen Achsanordnungen | 140 |
| 8.2.4 | Besondere Konstruktionsansätze bei vierarmigen Kreisverkehren | 144 |
| 8.2.5 | Empfehlungen für die Entwurfspraxis bei vierarmigen Kreisverkehren | 148 |
| 8.3 | Weiterführende Überlegungen zu dreiarmligen Kreisverkehren | 150 |
| 8.3.1 | Anlass | 150 |
| 8.3.2 | Besondere Konstruktionsansätze bei dreiarmligen Kreisverkehren | 151 |
| 8.3.3 | Empfehlungen für die Entwurfspraxis bei dreiarmligen Kreisverkehren | 155 |
| 9 | Fazit und Ausblick..... | 156 |
| 9.1 | Zusammenfassung der Untersuchungsmethoden | 156 |
| 9.1.1 | Allgemeines | 156 |
| 9.1.2 | Analyse der Entwurfsgeometrie..... | 156 |
| 9.1.3 | Zufahrtsgenaue Unfallanalyse mit DTV-Bezug..... | 156 |
| 9.1.4 | Zusammenhänge zwischen Unfallgeschehen und Entwurfsgeometrie | 157 |
| 9.1.5 | Fahrverhaltensuntersuchung..... | 157 |
| 9.1.6 | Herleiten der Prüfparameter TE und 2T..... | 158 |
| 9.1.7 | Aufstellen und Überprüfen von Anforderungen an die Prüfparameter..... | 159 |
| 9.2 | Empfehlungen für den Entwurf verkehrssicherer Kreisverkehre | 159 |
| 9.2.1 | Allgemeines | 159 |
| 9.2.2 | Empfehlungen zu den Entwurfsgrundlagen | 160 |
| 9.2.3 | Empfehlungen für einen geführten oder einen freien Entwurf | 160 |
| 9.2.4 | Besondere Empfehlungen für die Anlage von vierarmigen Kreisverkehren | 161 |
| 9.2.5 | Besondere Empfehlungen für die Anlage von dreiarmligen Kreisverkehren | 162 |
| 9.2.6 | Weitere aktuelle Forschungsergebnisse..... | 164 |
| 9.3 | Kritische Würdigung der eingesetzten Methoden und Verfahren | 167 |
| 9.4 | Weiterer Forschungsbedarf..... | 168 |
| 9.4.1 | Allgemeiner Forschungsbedarf..... | 168 |
| 9.4.2 | Statistische Methoden in der Verkehrsverhaltensanalyse..... | 170 |
| 10 | Literaturverzeichnis | 173 |
| 11 | Abbildungsverzeichnis | 178 |
| 12 | Tabellenverzeichnis | 184 |
| 13 | Abkürzungsverzeichnis | 186 |
| 14 | Anlagen..... | 189 |
| 14.1 | Konstruktion der abstrakten Fahrlinien | 189 |
| 14.2 | Ergänzende Informationen zu Lage und Geometrie der Kreisverkehre..... | 190 |
| 14.3 | Verkehrsstärken (DTV) der Kreisverkehre..... | 191 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 14.4 | Bestimmung der angepassten Unfallkosten | 192 |
| 14.4.1 | Allgemeines | 192 |
| 14.4.2 | Verunglücktencharfe Unfallkostensätze | 193 |
| 14.4.3 | Pauschale Unfallkosten | 194 |
| 14.4.4 | Angepasste Unfallkostensätze | 194 |
| 14.4.5 | Kritische Würdigung der (angepassten) Unfallkostensätze | 197 |
| 14.5 | Übersicht über das Gesamtunfallgeschehen (Kollektiv 1.1) | 197 |
| 14.6 | Unfallschwererstruktur von Kollektiv 1.2 | 200 |
| 14.7 | Unfallmerkmal Alkoholkonsum | 200 |
| 14.8 | Übersicht über Kreisverkehre und Unfälle im Kollektiv 1.4 | 202 |
| 14.9 | Geschwindigkeitsverlaufslinien der Kreisverkehre | 204 |
| 14.9.1 | Allgemeines | 204 |
| 14.9.2 | Geschwindigkeitsverlaufslinien Kreisverkehr (1) Karlsruhe-Neureut | 205 |
| 14.9.3 | Geschwindigkeitsverlaufslinien Kreisverkehr (2) Flehingen-Luisenhof | 207 |
| 14.9.4 | Geschwindigkeitsverlaufslinien Kreisverkehr (3) Ubstadt-Weiher | 209 |
| 14.9.5 | Geschwindigkeitsverlaufslinien Kreisverkehr (4) Ringsheim | 211 |
| 14.9.6 | Geschwindigkeitsverlaufslinien Kreisverkehr (5) Pfinztal-Söllingen | 212 |
| 14.10 | Diagramme Geschwindigkeitsverhalten und Geometrie | 213 |
| 14.10.1 | Ausgewählte Entwurfparameter – lineare Regression | 213 |
| 14.10.2 | Ausgewählte Entwurfparameter – quadratische Regression | 214 |
| 14.10.3 | Ausgewählte Verhältnisparameter – lineare Regression | 215 |
| 14.10.4 | Ausgewählte Verhältnisparameter – quadratische Regression | 216 |
| 14.11 | Kurvigkeiten der Fahrlinien im Kollektiv 1.4 | 218 |
| 14.12 | Diagramme Geschwindigkeitsverhalten und Lenkverhalten | 218 |
| 14.12.1 | Kurvigkeit – lineare Regression | 218 |
| 14.12.2 | Einfahrwinkel – lineare Regression | 220 |
| 14.12.3 | Geschwindigkeitsdifferenzen und Kurvigkeit | 220 |
| 14.13 | Berechnung der RIS-P-Werte | 221 |
| 14.14 | Überlagerung von Unfallkennwerten und Prüfparametern | 225 |
| 14.15 | Werte für 2T und TE im Rahmen der Variation von R_i und B_i | 227 |
| 14.16 | Werte für 2T und TE im Rahmen der Variation der Achsanordnungen | 228 |
| 14.16.1 | Variation der Winkel | 228 |
| 14.16.2 | Punktsymmetrische Rechts- und Linksversätze | 229 |
| 14.16.3 | Einseitige Achsversätze | 230 |
| 14.17 | „Klothoiden-Kreisverkehre“ | 231 |
| 14.18 | Variationen dreiarmer Kreisverkehre | 233 |
| 14.19 | Vergleich Unfalldatenkollektive mit aktuellen Untersuchungen | 234 |

1 Einleitung

1.1 Anlass und Ziel

Der Kreisverkehr ist eine grundsätzlich sehr sichere Knotenpunktart. Belege hierfür finden sich u.a. in Vorher-Nachher-Untersuchungen von Knotenpunkten, die von Kreuzungen zu Kreisverkehren umgebaut wurden (z.B. STUWE, 1992; RICHTER UND HÜSKEN, 1998) oder in vergleichenden Untersuchungen zwischen verschiedenen Knotenpunktarten (VIETEN ET AL., 2010).

Dieses höhere Sicherheitsniveau resultiert vor allem daher, dass an Kreisverkehren weniger Unfälle mit schweren Folgen auftreten. Dies wird vor allem auf die geringere Konfliktpunkanzahl sowie das niedrigere Geschwindigkeitsniveau an Kreisverkehren zurückgeführt (so treten z.B. schwere Kollisionen mit zwei sich kreuzenden Fahrzeugen, die einen vorfahrtsgeregelten Knotenpunkt annähernd mit ihrer Streckengeschwindigkeit befahren, an Kreisverkehren nicht auf). Die Unfallkostenrate, die die Schwere der Unfallfolgen ausdrückt, beträgt bei vorfahrtsgeregelten Knotenpunkten etwa das Dreifache des Wertes von Kreisverkehren; die reinen Unfallanzahlen unterscheiden sich jedoch nur noch mit dem Faktor 1,5 (VIETEN ET AL., 2010). Die besonderen Vorzüge des Kreisverkehrs ergeben sich daher vor allem aus der erheblich geringeren Unfallschwere gegenüber anderen Knotenpunktarten und weniger aus der Unfallanzahl.

Eigene Untersuchungen zeigen, dass sich der überwiegende Teil der Kreisverkehrsunfälle zwei sehr homogenen Gruppen zuordnen lässt: Fahrunfälle (Unfalltyp 1) mit Auffahren auf den Fahrbahnteiler bzw. die Kreisinsel einerseits sowie Einbiegen-Unfälle (Unfalltyp 3) bei der Einfahrt andererseits. Die schon deutlich kleinere, drittgrößte Gruppe bilden Unfälle im Längsverkehr (Unfalltyp 6) im Vorfeld der Einfahrt (also innerhalb der Zufahrt). Für alle aufgeführten Unfalltypen ist die Ursache im unmittelbaren Zufahrtsbereich zu lokalisieren. Ein maßgeblicher Einfluss auf das Unfallgeschehen wird daher in konkreten Gestaltungsdetails einer jeden einzelnen Kreisverkehrszufahrt vermutet.

Zur Überprüfung dieser These soll der Frage nachgegangen werden, welcher Zusammenhang zwischen der Gestaltung von Kreisverkehrszufahrten und der Verkehrssicherheit an Kreisverkehren besteht. Da sich das Verkehrsverhalten allgemein und damit auch die Unfälle nur selten auf isoliert betrachtete geometrische Kenngrößen zurückführen lassen, sondern vielmehr die geometrischen Konstellationen auf das Fahrverhalten einwirken, soll in diesem Zusammenhang auch das Fahr- und Geschwindigkeitsverhalten in Kreisverkehren analysiert werden.

Ziel ist es, die Ursache- und Wirkungszusammenhänge zwischen den geometrischen Kenngrößen und dem Fahrverhalten bzw. der Verkehrssicherheit an Kreisverkehren außerorts qualitativ und quantitativ zu erarbeiten und Kriterien festzulegen, anhand derer geplante und bestehende Kreisverkehre bewertet werden können.

1.2 Begriffshinweise

Im Folgenden wird, auch wenn allgemein der Begriff Kreisverkehre Verwendung findet, ausschließlich auf sogenannte „kleine Kreisverkehre“ außerhalb bebauter Gebiete Bezug genommen. Außerdem wird vorrangig das Verhalten des Pkw-Verkehrs im Zu- und Einfahrtsbereich zum Kreisverkehr betrachtet: Das Verhalten von Zweirädern wird nicht gezielt thematisiert, da zum einen Motorradfahrer am Unfallgeschehen in Kreisverkehren wenig beteiligt sind und zum anderen sich deren Fahrverhalten gerade in engen Kurvenfolgen systematisch von dem anderer Verkehrsbeteiligter unterscheidet. Analog gilt dies für Lkw, deren Fahrverhalten in Kreisverkehren aufgrund ihrer Abmessungen fahrgeometrisch und nicht fahrdynamisch geprägt ist.

Zur Vereinheitlichung der in der Literatur nicht immer klar getrennten Bezeichnungen werden für die vorliegende Arbeit folgende Definitionen eingeführt:

Zufahrt und Einfahrt

Jede an einen Kreisverkehr angeschlossene Straße bildet einen *Kreisverkehrsarm*, i.d.R. mit je einer Möglichkeit zum Ein- und Ausfahren auf die Kreisfahrbahn. Eine Straße, die z.B. widmungsrechtlich über den Kreisverkehr hinwegführt, ist also an einer Kreisverkehrsanlage i.d.R. mit zwei Armen vertreten. Arme haben keine feste Längenausdehnung.

Die *Zufahrt* umfasst den fahrtrichtungsbezogen auf den Kreisverkehr zuführenden Bereich eines Kreisverkehrsarmes inklusive der engeren Vorfeldsituation des Kreisverkehrs bis zur Kreisfahrbahnaußenseite.

Die *Einfahrt* in einen Kreisverkehr bezeichnet sowohl die Überfahrt eines Fahrzeugs von der Zufahrt (dem Kreisverkehrsarm) auf die Kreisfahrbahn (Überfahrt über die Kreisfahrbahnaußenkante) als Aktion als auch die räumliche Situation im Rahmen dieser Überfahrt.

Radiale und tangentielle Zufahrten

Als *radial* werden Zufahrten charakterisiert, bei denen die Zufahrtsachse möglichst lange parallel zur Straßenachse geführt wird. Idealerweise treffen beide Achsen mit einem Winkel von etwa 100 gon auf die Kreisfahrbahn; die Straßenachse führt dabei möglichst durch den Kreisverkehrsmittelpunkt, die Zufahrtsachse etwas rechts versetzt davon. Im Bereich der unmittelbaren Zufahrt ist die Ausrundung am rechten Fahrbahnrand (R_z gemäß Bild 2.1) eher klein. Somit entsprechen sehr radiale Zufahrten am ehesten einer rechtwinkligen Einmündung einer untergeordneten Straße.

Tangentiale Zufahrten entsprechen hingegen eher einem Zusammenführen zweier im Einrichtungsverkehr befahrenen Rampenfahrbahnen in spitzem Winkel, so dass die Fahrlinien von Fahrzeugen auf der Kreisfahrbahn bzw. zufahrender Fahrzeuge im Einfahrbereich fast schon parallel verlaufen. Bei sehr tangentialen Zufahrten kann die verlängerte Fahrlinie im Moment

der Einfahrt dadurch auch an der Kreisinsel vorbeiführen. Die Zufahrtsachse ist nach rechts ausgelenkt und verfehlt den Kreismittelpunkt deutlich.

Verkehrsbeziehungen

An Kreisverkehren kann ein Fahrzeug bei der Einfahrt verkehrsrechtlich korrekt lediglich in die bevorrechtigte Kreisfahrbahn nach rechts einbiegen und bei der Ausfahrt wiederum rechts abbiegen, unabhängig davon, an welcher Stelle in Bezug zur Einfahrt ausgefahren wird. Die „globalen“ Verkehrsbeziehungen an einem Kreisverkehr können damit nicht verständlich und gut lesbar dargestellt werden. Daher werden in dieser Arbeit die Begriffe *Rechtsabbieger*, *Geradeausfahrer* und *Linksabbieger* sowie davon abgeleitete Begriffe bzw. Umschreibungen wie z.B. (*sinngemäß*) *geradeaus fahrende Fahrzeuge* so benutzt, wie sie bei einem plangleichen Knotenpunkt mit der gleichen Anzahl an Zufahrten angewendet würden.

2 Stand der Technik

2.1 Anforderungen an den Entwurf kleiner Kreisverkehre in Deutschland

2.1.1 Entwicklung der Entwurfsregelwerke und ihres Sicherheitsgedankens

Nach BRILON (1999) begann die sogenannte „Renaissance der Kreisverkehre“ in den 1980er Jahren, als, beruhend auf positiven Erfahrungen vor allem aus Frankreich, der Kreisverkehr zunächst als modellhafte Anlage erfolgreich eingesetzt wurde, so z.B. an Unfallschwerpunkten außerorts in Baden-Württemberg (ZIEGLER, 1999). Schon früh wurde erkannt, dass neben der Reduktion der Konfliktpunktzahl auch die durch die Kreisverkehrsanlage reduzierten Geschwindigkeiten – das insgesamt niedrigere Geschwindigkeitsniveau jedes einzelnen Verkehrsteilnehmers, aber auch niedrige Geschwindigkeitsdifferenzen der beteiligten Verkehrsteilnehmer untereinander – einen entscheidenden Anteil am Verkehrssicherheitsgewinn haben (BRILON, 1997).

Die Planer gerade der sehr frühen Kreisverkehrsanlagen konnten sich teilweise an entwurfsgeometrischen Größenordnungen aus dem Ausland orientieren, wo Kreisverkehre bereits über viele Jahre dauerhaft eingesetzt und auch weiterentwickelt wurden. Hierbei ist vor allem Großbritannien zu nennen (vgl. LINDENMANN UND SPACEK, 1991; BRILON, 1999) bzw. allgemein die Länder, in denen die „Kreisverkehrsrenaissance“ früher begann als in Deutschland. So wurde die Zahl der Kreisverkehre in Frankreich und Großbritannien 1999 auf jeweils über 15.000 Anlagen geschätzt (BRILON, 1999). Zum Vergleich: Der deutschlandweite Bestand wurde für das Jahr 1995 auf ca. 75 Anlagen außerorts bzw. an Ortsrändern beziffert (RICHTER UND HÜSKEN, 1998). Die in dieser frühen Zeit gesammelten Erkenntnisse wurden durch das Bundesland Nordrhein-Westfalen unter wissenschaftlicher Begleitung (insb. BRILON) zusammengetragen und als Empfehlungen des für Verkehr zuständigen Landesministeriums von Nordrhein-Westfalen herausgegeben (MSV NRW, 1993). Diesen Empfehlungen liegt noch ein „stark propagierte[s] Entwurfsprinzip der deutlichen Geschwindigkeitsdämpfung“ zugrunde (HALLER, 1999).

Das im Folgenden veröffentlichte Merkblatt für die Anlage von kleinen Kreisverkehrsplätzen (M KLKV) der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV) aus dem Jahre 1998 weist viele inhaltliche Übereinstimmungen zu den NRW-Empfehlungen auf. Obwohl auch hier als Entwurfsziel auf eine „konsequent geschwindigkeitsdämpfende Ausbildung“ hingewiesen wird (M KLKV, 1998), berichtet HALLER im Rahmen eines Symposiums 1999, dass im Text des damals neuen FGSV-Merkblattes das o.a. „Entwurfsprinzip der deutlichen Geschwindigkeitsdämpfung“ mit „anderen Entwurfsauffassungen [...], die zu zügiger befahrbaren“ Kreisverkehren führen, in ausgleichender Weise überlagert wurde bzw. werden musste

(HALLER, 1999). Weiterhin wurde im FGSV-Merkblatt von 1998 die Prüfgröße der Ablenkung (damals noch „Auslenkung“) für (sinngemäß) geradeaus fahrende Fahrzeuge eingeführt.

2006 wurde das Merkblatt neu aufgelegt – nun als Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren (M KV) –, wobei allerdings die vormals noch eher strikt bzw. eng gefassten Vorgaben zum Erreichen eines niedrigen Geschwindigkeitsniveaus abermals etwas aufgeweicht wurden, was der von HALLER beschriebenen „zügigeren Befahrbarkeit“ weiter entgegenkam (vgl. HALLER, 1999). So heißt es bspw. noch 1998 allgemein für alle Kreisverkehre: „Die Eckausrundungen sind wegen der gewünschten Geschwindigkeitsdämpfung möglichst klein zu halten“ (M KLKV, 1998). In der Fassung von 2006 wird dies eingegrenzt zu „Eckausrundungen [...] sind innerhalb bebauter Gebiete wegen der gewünschten Geschwindigkeitsdämpfung möglichst klein zu halten“ (M KV, 2006).

In den 2012 veröffentlichten und als Querschnittsregelwerk aufgebauten Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL) finden sich erstmals auf dieser Regelwerksebene dezidierte Ausführungen zum Entwurf von Kreisverkehren.

2.1.2 Betrachtung ausgewählter Entwurfsgrößen und -elemente

Um die Entwurfsgrundsätze von Kreisverkehren hinsichtlich einer verkehrssicheren Gestaltung zu gewährleisten, sind neben den immer einstreifig auszuführenden Ausfahrten zwei Bereiche von Bedeutung, die im FGSV-Merkblatt als „maßgeblich“ hervorgehoben werden:

- Die Zufahrt mit besonderem Augenmerk auf eine senkrechte Führung der Fahrzeuge und
- die Kreisdurchfahrt mit Augenmerk auf die Um- bzw. Ablenkung (M KV, 2006).

Daher werden im folgenden Entwurfsgrößen und -elemente vertieft betrachtet, die das Fahrverhalten in diesen Bereichen beeinflussen.

Außendurchmesser und Breite der Kreisfahrbahn

Relativ unstrittig sind in den aktuell gültigen Regelwerken die empfohlenen Werte für den Außendurchmesser D (30 m bzw. 35 bis 50 m sind möglich, im Regelfall sind 35 bis 45 m anzustreben) sowie für das Verhältnis zwischen Außendurchmesser D und Breite der umlaufenden Kreisfahrbahn B_K (z.B. 7,5 m inkl. Randstreifen bei einem Außendurchmesser von 35 bis 40 m, vgl. M KV, 2006; RAL, 2012). Im Vergleich zu früheren Regelwerken sind die Werte für die Kreisfahrbahnbreite angestiegen (M KLKV, 1998).

Breite und Ausrundungen der Zufahrt

Da die Zufahrten von Kreisverkehren zur Anpassung an die Fahrgeometrie mit Ausrundungen an der Außenseite versehen sind (R_Z), nimmt die Breite des Fahrstreifens im Anschlussbereich

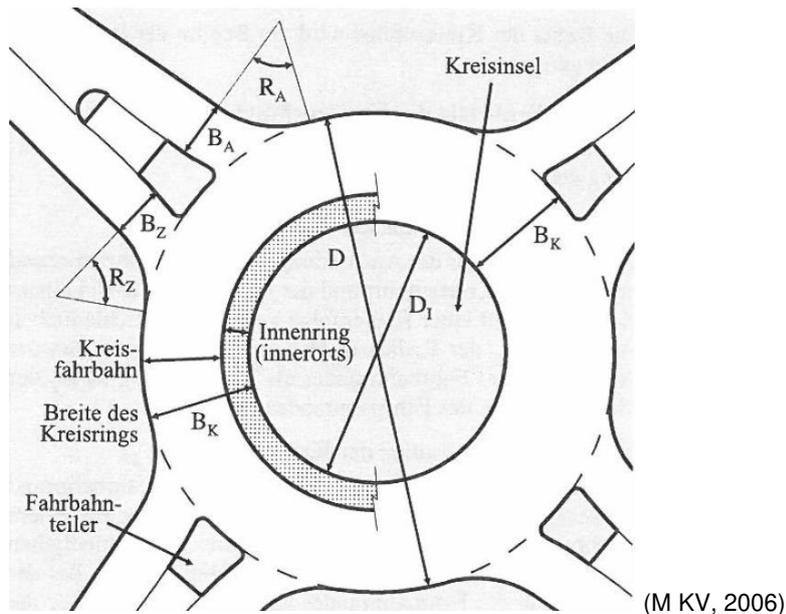


Bild 2.1: Gestaltungselemente und Maße eines Kreisverkehrs (Systemskizze)

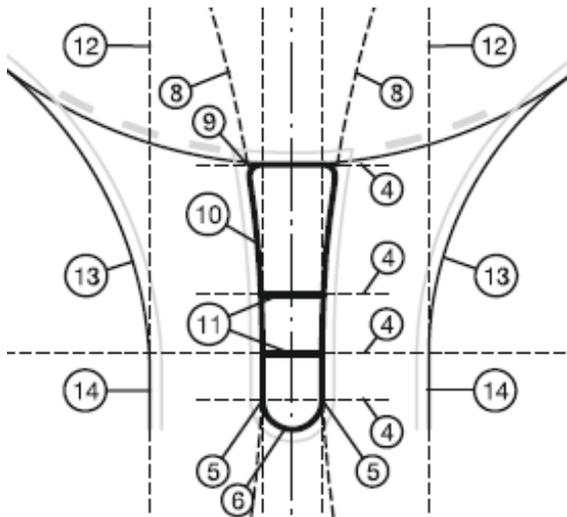
zur Kreisfahrbahn zu. Die Fahrstreifenbreite B_Z wird am Beginn der ECKAUSRUNDUNG gemessen (vgl. Bild 2.1). Sie wird in den Regelwerken mit 3,5 bis 4,0 m (M KV, 2006) bzw. 4,5 bis 5,0 m (RAL, 2012) angegeben, wobei von den RAL-Maßen insgesamt 0,75 m auf die Randstreifen entfallen.

Für die ECKAUSRUNDUNG von Kreiszufahrten kommt ein einfacher Kreisbogen mit Radien von 14 bis 16 m außerorts zum Einsatz. Es gilt weiterhin, dass – falls in dieser Zufahrt keine Querung von Radfahrern oder Fußgängern über den Fahrbahnteiler vorgesehen ist – die Obergrenze für ECKAUSRUNDUNGEN um bis zu 30 % überschritten werden darf; mithin gilt als maximaler Radius einer ECKAUSRUNDUNG 20,8 m (M KV, 2006; RAL, 2012). In den frühen NRW-Hinweisen wird die Breite mit maximal 3,5 m benannt und die Ausrundung auf 10 bis 12 m begrenzt (MSV NRW, 1993). Auch diese Maße sind im Laufe der Jahre also etwas „angewachsen“.

Angaben zum Fahrbahnteiler

Nach den RAL (2012) sind zwischen den Kreisein- und Kreisausfahrten Fahrbahnteiler anzulegen, deren Achsen ebenfalls auf den Kreismittelpunkt ausgerichtet sein sollen. Im Anhang der RAL sind zudem Konstruktionshinweise für Fahrbahnteiler angegeben; danach soll dieses Element eine längliche Form (Länge ca. 11,25 m) mit einer in weiten Teilen konstanten Breite von 2,5 m erhalten (vgl. Bild 2.2).

Solche Konstruktionshinweise fehlen in den vorherigen Merkblättern ganz; es sind neben beispielhaften Abbildungen (vgl. Bild 2.3) lediglich Mindestmaße zur Breite angegeben (z.B. mind. 1,6 m, vgl. M KLKV, 1998; M KV, 2006). Darüber hinaus finden sich vornehmlich verbale Hinweise: Beispielsweise sollen bei den Fahrbahnteilern von Außerortskreisverkehren „die



(RAL, 2012)

Bild 2.2: Fahrbahnteiler an einem Kreisverkehr



Beispiel für einen dem Fahrverlauf angepassten Fahrbahnteiler (M KLV, 1998)



Fahrbahnteiler mit dem Fahrverlauf angepassten Rändern (M KV, 2006)

Bild 2.3: Beispiele für Fahrbahnteiler

Ränder wegen der besseren Erkennbarkeit aus einer möglichst gleichförmigen Krümmung der Fahrstreifen so entwickelt werden, dass die erforderlichen Breiten an den Überquerungsstellen [für schwache Verkehrsteilnehmer] erreicht werden“ (M KV, 2006).

Ablenkung

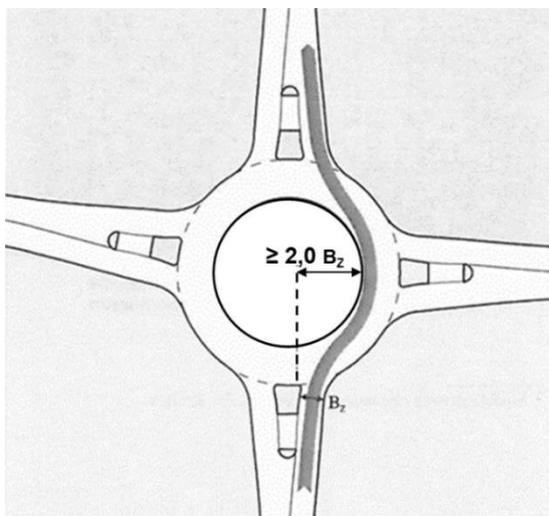
Der Ablenkung der Fahrlinie durch das Umfahren der Kreisinsel kommt hinsichtlich ihres Einflusses auf das Fahr- und Geschwindigkeitsverhalten im Kreisverkehr eine maßgebliche Bedeutung zu. Als Grundprinzipien für verkehrssicher gestaltete Kreisverkehre gelten u.a. das „senkrechte Heranführen“ der Fahrzeuge durch eine radiale Ausrichtung der „Achsen der zu verknüpfenden Straßen [...] auf den Kreismittelpunkt“ (RAL, 2012) sowie eine „deutliche Umlenkung geradeausfahrender Fahrzeuge durch die Kreisinsel“ (M KV, 2006). Zur Ablenkung unmittelbar vor der Einfahrt auf die Kreisfahrbahn ist vermerkt, dass „tangentiale oder spitzwinklige Knotenpunktzufahrten“ zu vermeiden sind und dass sich bei radialer Ausrichtung der

Straßenachsen „zwischen der Mittellinie der zuführenden Fahrbahn¹ und der Kreisfahrbahn ein Winkel von etwa 60 gon“ ergebe (M KV, 2006).

Zur Ablenkung durch die Kreisinsel findet sich die Formulierung, die „Ablenkung geradeausfahrender Fahrzeuge durch die Kreisinsel sollte das Zweifache der Fahrstreifenbreite der Knotenpunktzufahrt nicht unterschreiten“ (M KV, 2006). Für eine beispielhafte Fahrstreifenbreite der Zufahrt von 4,0 m ergibt sich eine Ablenkung von mind. 8,0 m, was bspw. bei einem Kreisinselradius von 12,5 m (Außendurchmesser 40 m, Kreisfahrbahnbreite 7,5 m) bei symmetrischen Verhältnissen prinzipiell immer eingehalten werden kann. Aus der entsprechenden Abbildung im M KV (2006) ist auch ersichtlich, dass die Verlängerung des rechten Randes des Fahrbahnteilers die Bezugslinie für die Ablenkung darstellt (vgl. Bild 2.4). Daraus kann unterstellt werden, dass auch das Regelwerk der Fahrlinie in der Zufahrt eine bedeutende Rolle zuschreibt.

2.1.3 Fazit zu entwurfsgeometrischen Anforderungen in Deutschland

Im deutschen Entwurfsregelwerk für Kreisverkehre ist von Anfang an ein vertieftes Augenmerk auf das Sicherheitsniveau gelegt worden. Auch wenn das nach wie vor der Fall ist, so scheint der früher sehr starke Fokus auf die kausale Verknüpfung von niedrigem Geschwindigkeits- und hohem Sicherheitsniveau gegenüber anderen Zielen etwas verschoben worden zu sein, was sich u.a. in großzügigeren Maßen einiger Entwurfselemente niederschlägt, welche die – auch schnellere – Befahrbarkeit erleichtern. Bis zur Einführung der RAL im Jahre 2012 wurden im Regelwerk kaum konkrete Festlegungen zur Gestaltung der Fahrbahnteiler getroffen, was in der Praxis tlw. zu Ausführungen mit starken Aufweitungen zur Kreisfahrbahn hin bis zu Dreiecksformen geführt hat (vgl. Bild 2.3), die auch bei einer radialen Achsausrichtung eine tangentielle Einfahrt fördern.



Eigene Bearbeitung (2021) auf Basis von M KV (2006)

Bild 2.4: Ablenkmaß im Kreisverkehr

¹ Hier ist unter dem Begriff „Fahrbahn“ der Fahrstreifen der Kreisverkehrszufahrt zu verstehen, der durch den Fahrbahnteiler von der Ausfahrt räumlich getrennt ist.

Nach wie vor gibt es keine Angaben zur Länge der Eckausrundung, auch wenn sie naheliegenderweise indirekt von Aspekten wie Achsanordnung, Form des Fahrbahnteilers etc. abhängt. Da durch das Zusammenspiel zwischen Fahrbahnteiler und insbesondere sehr langen Eckausrundungen die nutzbare Breite der Zufahrt bei Annäherung an die Kreisfahrbahn zunimmt, fehlt in solchen Fällen eine klare Führung; das betrifft nicht zuletzt die Bestimmung der Ablenkung. So können Kreisverkehre zwar formell ausreichende Ablenkungen aufweisen, durch zu lange Eckausrundungen können diese allerdings konterkariert werden, wenn die tatsächlichen Fahrlinien stark von den Ablenkungs-Bezugslinien abweichen.

2.2 Anforderungen an den Entwurf kleiner Kreisverkehre im Ausland

2.2.1 Überblick und Auswahl bestimmter Länder

In den Entwurfsregelwerken anderer Länder ist der Sicherheitsgedanke unterschiedlich verankert. Beispielfhaft werden hierzu die Regelwerke der folgenden Länder betrachtet:

- Schweiz (mit konstruierbaren Anforderungen an Einfahrts- und Ablenkungswinkel)
- Frankreich (ein klassisches „Kreisverkehrs-Land“, wo eher tangentialer Zufahrten Verwendung finden)
- Niederlande (mit allgemein anerkannt hohem Niveau in der Straßenverkehrssicherheit, vgl. z.B. EU-Kommission, 2018).

2.2.2 Schweiz

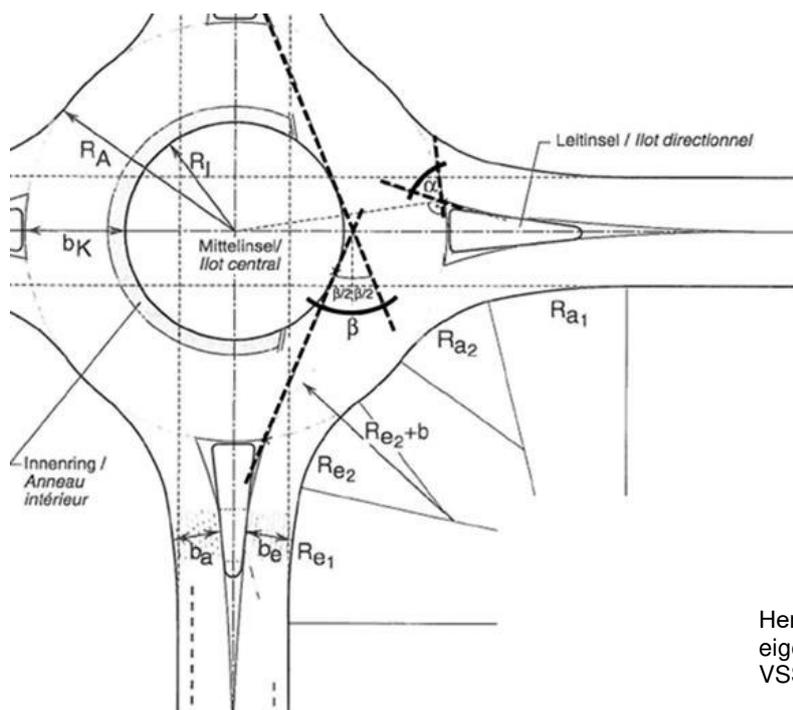
Schon frühere Sicherheitsuntersuchungen bescheinigten den einstreifigen schweizerischen Kreisverkehren noch vor Vorliegen der ersten detaillierten Projektierungsempfehlungen (Entwurfsrichtlinien) ein signifikant niedriges Niveau an Unfällen mit Personenschaden. Hierfür werden neben einstreifig ausgeführten Zufahrten u.a. ein ausreichender Fahrbahnversatz (Ablenkung) für eine „genügende Geschwindigkeitsreduktion“ und eine Unterbrechung der „optischen Geradlinigkeit“ jeweils durch eine entsprechende Anordnung bzw. Gestaltung der Mittelinsel gefordert (HUBER, 1995).

In Vorlesungsunterlagen der ETH Zürich von LINDENMANN und SPACEK (1991) wird die Leitinsel (Fahrbahnteiler) als „kurz und gedrungen“ sowie „trichterförmig“ beschrieben; die Mindestbreite zur Kreisfahrbahn hin wird mit 4,0 m für übergeordnete und mit 2,0 m für untergeordnete Straßen angegeben. Dem so gestalteten Fahrbahnteiler wird ein maßgeblicher Einfluss auf die sicherheitsfördernde Geschwindigkeitsreduzierung in der Zufahrt zugeschrieben, wobei durch eine „flachwinkliger Zusammenführung der Ströme in gleicher Richtung“ (ebd.) definierte Konfliktflächen entstehen sollen. Als Zielgröße der Fahrgeschwindigkeit in einem Kreisverkehr werden „ca. 20 bis 30 km/h“ angegeben. Während der Zufahrt soll der Fahrzeugführer „auf die Mittelinsel zufahren und in der Fortsetzung [...] (der) Fahrtrichtung einen deutlichen optischen

Versatz sehen“ (ebd.). Weiterhin wird empfohlen, die Durchsicht über die Mittelinsel zu verhindern. Die Abstände zwischen den Zufahrten sollen etwa gleich und möglichst groß sein (LINDENMANN UND SPACEK, 1991), mithin bei vierarmigen Kreisverkehren etwa 100 gon betragen.

In einer großen schweizweiten Studie wurden Verkehrsverhalten und Sicherheit an Kreisverkehren untersucht und Entwurfsempfehlungen abgeleitet. Zu beachten ist bei dieser Untersuchung, dass von 32 betrachteten Kreisverkehren nur vier außerorts liegen; bei der Auswertung wird hierauf nicht gesondert Bezug genommen. Von Interesse ist der aus den Auswertungen entwickelte Winkel β bzgl. der Ablenkung durch die Mittelinsel, der als das „für das Verkehrsverhalten auf einer Kreiselanlage massgebende [sic!] Projektierungselement“ bewertet wird (BÜHLMANN UND SPACEK, 1997). Darüber hinaus konnte ein geringer Einfluss durch die Ausweitung der Leitinsel (Winkel α) festgestellt werden, jedoch war ein Anstieg der Unfallanzahl an der nachfolgenden Zufahrt bei kleinen Winkeln festzustellen.

Die auf dieser Grundlage von der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS) erarbeitete und bis heute gültige Entwurfsrichtlinie (VSS-Norm SN 640 263) enthält im Wesentlichen diese Festlegungen (vgl. Bild 2.5). Die Norm benennt explizite Anforderungen an den Einfahrwinkel α und den Ablenkungswinkel β , auch in Abhängigkeit zueinander: „Lassen sich kleine Einfahrwinkel $\alpha < \text{ca. } 70 \text{ gon}$ nicht vermeiden, ist aus Sicherheitsgründen eine deutliche Ablenkung durch die Mittelinsel (Ablenkungswinkel $\beta > \text{ca. } 45 \text{ gon}$ [...]) erforderlich“; als Zielgröße für α gelten 80 bis 90 gon, damit „die Fahrzeuglenker möglichst direkt auf die Mittelinsel zugeführt werden“ (SN 640 263, 1999). Für die verschiedenen Ausprägungen der Winkel β nennt das Regelwerk zudem das zu erwartende Geschwindigkeitsniveau: Für $\beta < 20 \text{ gon}$ sind



Hervorhebung der Winkel α und β durch eigene Bearbeitung (2021) auf Basis von VSS-Norm SN 640 263 (1999)

Bild 2.5: Schweizer Entwurfsregelwerk: Projektierungselemente eines Kreisverkehrs

demnach 40 km/h zu erwarten, für $\beta > 45$ gon etwa 30 km/h, dazwischen entsprechend ca. 35 km/h. Für die o.a. Zielgröße von „unter 30 km/h“ wären somit größere Winkel β erforderlich.

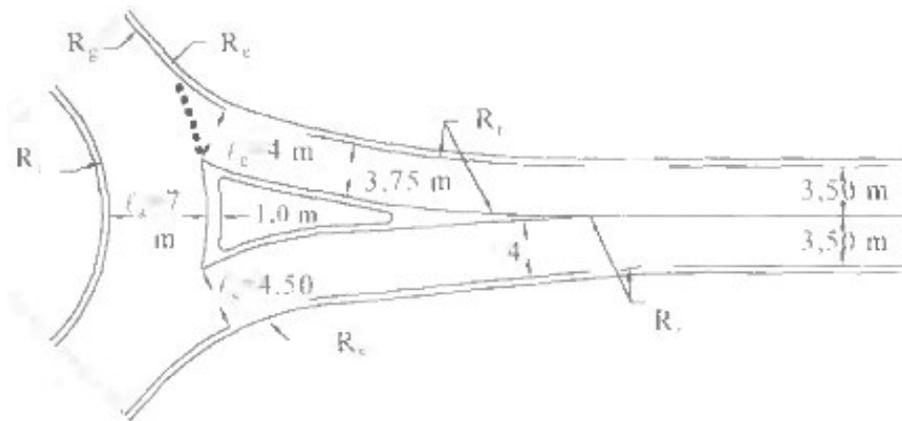
Für den Außendurchmesser von Kreisverkehren an „Strassen ausserhalb besiedelter Gebiete“ werden 30 bis 40 m als Richtwert empfohlen bzw. Überschreitungsmöglichkeiten nur für durchgängig einstreifige Kreisverkehre erwähnt.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass gerade für den Fahrbahnteiler etwas andere, auch nicht in jedem Fall wertemäßig festgelegte Vorgaben existieren. Die Zielgröße für die infolge der Form des Fahrbahnteilers entstehenden Einfahrwinkel wird jedoch klar benannt, womit der „gedrungenen Trichterform“ im Umkehrschluss wieder enge Grenzen gesetzt sind. Erkennbar ist zudem, dass die Fahrstreifenbreite in der Zufahrt grundsätzlich recht konstant bleibt und der Fahrstreifenbreite der freien Strecke entsprechen sollte, womit eine vergleichsweise eingengte Führung der Fahrzeuge mit anschaulich sehr ähnlichen Fahrlinien erreicht werden kann; dies wird allerdings durch weiterführende kantonale Vorgaben für breitere Zufahrten z.B. aus Gründen der Schneeräumung wieder konterkariert.

2.2.3 Frankreich

Das französische Regelwerk „Aménagement des Carrefours Interurbains – Carrefours plan“ (sinngemäß übersetzt: Anlage von zwischenörtlichen Knotenpunkten – plangleiche Knotenpunkte) von 1998 enthält u.a. Entwurfskriterien und allgemein zulässige Entwurfsgrößen für Kreisverkehre (SETRA, 1998). Die Außendurchmesser sind mit etwa 24 bis 50 m und die Kreisfahrbahnbreiten mit 6,0 bis 9,0 m angegeben. Die auffälligste Abweichung der Entwurfsformen findet sich beim Fahrbahnteiler. Für diesen sind grundsätzlich gestreckte dreieckige Formen vorgesehen, die in der Länge etwa dem Außenradius des Kreisverkehrs entsprechen sollen. Durch die zur Kreisfahrbahn hin aufgeweitete Form (die Breite an der Kreisinsel soll einem Viertel des Außenradius entsprechen, also etwa 3,0 bis 6,0 m) entstehen Einfahrten mit einer recht tangentialen Führung. Die vergleichsweise niedrig angesetzte Eckausrundung in der Zufahrt von 10 bis 15 m kommt erst am Ende der Zufahrt zur Kreisfahrbahn hin zum Tragen, zuvor ist die Zufahrt im Bereich des Fahrbahnteilers mit geraden Kanten versehen (vgl. Bild 2.6). Die Fahrbahnbreite in der Zufahrt ist auf 4,0 m festgesetzt.

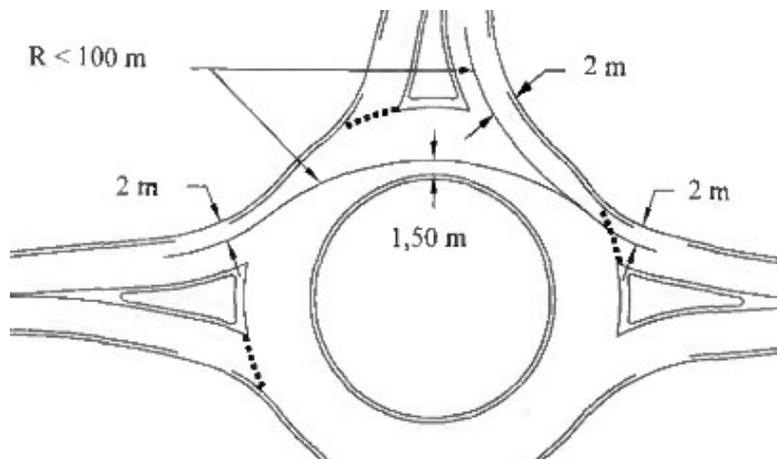
Hervorgehoben wird an mehreren Stellen, unter anderem bei der Aufzählung der grundlegenden Entwurfsprinzipien, dass ein „Überdimensionieren von Entwurfsgrößen“ verhängnisvoll für die Verkehrssicherheit ist und dass eine „Einengung“ oder „Führung der Fahrlinie“ erforderlich ist, um niedrige Geschwindigkeiten und dadurch ein höheres Sicherheitsniveau zu erhalten (SETRA, 1998). Eine solchermaßen geführte Fahrlinie soll keine Fahrgeschwindigkeiten von mehr als 50 km/h im Bereich des Kreisverkehrs zulassen.



(SETRA, 1998)

Bild 2.6: Französisches Entwurfsregelwerk: Schema eines Kreisverkehrsarmes für einen Außenradius $R_g = 20$ m. Zur Kontrolle wird mit Radien, die die Fahrlinien nachbilden, gearbeitet. Diese Radien sollen 100 m nicht überschreiten. Interessant ist, dass dieses Kriterium sowohl auf die Rechtsabbieger als auch die Geradeausfahrer gleichermaßen angewendet werden kann.

Das Beispiel in Bild 2.7 zeigt eine Fahrlinie mit einer „déflexion“ (Ablenkung der Fahrlinie) von etwa 30 m, dieser Wert wird als „vorzuziehender Wert“ benannt, um die erwähnten Geschwindigkeits- und Sicherheitsziele erreichen zu können. In der Abbildung und auch im zugehörigen Text des Regelwerks wird allerdings nicht näher darauf eingegangen, an welchen Stellen in der Zu- bzw. Ausfahrt der „2 m-Abstand“ angesetzt werden soll.



(SETRA, 1998)

Bild 2.7: Französisches Entwurfsregelwerk: Kontrolle der Ablenkung der Fahrlinie (déflexion)

2.2.4 Niederlande

Das Regelwerk „Roundabouts – Application and design“ aus den Niederlanden von 2009 bietet im Vergleich zu den bislang betrachteten Regelwerken interessante Abweichungen. Vorangestellt sind allgemeine Vorgaben: Die Achsen der Straßen sollen senkrecht in den Kreismittelpunkt führen und die Zufahrten radial gestaltet werden. Als Gründe hierfür werden genannt:

- Geschwindigkeitsreduzierung durch maximale Ablenkung
- Verdeutlichung des Kreisvortritts
- Übersichtlichkeit (V&W, 2009)

Weiterhin sind in einer Tabelle Standardmaße für Kreisverkehre vorgegeben. Bezogen auf die in dieser Arbeit verwendeten Maße ergibt sich: Außendurchmesser 36 m, Kreisfahrbahnbreite 5,25 m sowie die Festlegung, dass die Kreisinsel (Radius 12,75 m) auch außerorts einen 1,5 m breiten überfahrbaren Innenring erhält (diese 1,5 m werden vom Inselradius abgezogen). Die Zufahrtsbreite beträgt neben dem Fahrbahnteiler im Regelfall 3,5 m, für längere Bemessungsfahrzeuge 4,0 m (für diese steigt auch die Breite des Innenrings). Die Zufahrt ist mit einem Radius von 12,0 m ausgerundet. Selbst für den Fahrbahnteiler gibt es Vorgaben zur Form: Es ist eine längsrechteckige Form mit gleichbleibender Breite anzuwenden (Standardbreite 3,0 m, Länge 10 bis 15 m). Abweichungen von diesen Standardmaßen sind zulässig; z.B. gilt für Außendurchmesser ein Maß von mindestens 28 m und maximal 50 m, besser nicht mehr als 40 m. Für diese Wertebereiche der Außendurchmesser ist jedoch nicht immer explizit angegeben, wie mit den anderen Entwurfs-elementen verfahren werden soll. Eine der vorangestellten, allgemeinen Angaben fällt aber auf: „Ein- und Ausfahrradien sollen so klein wie möglich sein“ (V&W, 2009). Es ist davon auszugehen, dass im weit überwiegenden Fall der Standardkreisverkehr zum Einsatz kommt.

Weiterhin bietet das Regelwerk ein Kriterium, um die o.a. gewünschte Geschwindigkeitsreduzierung zu prüfen: Angestrebt werden Radien $R_{\text{Vehicle path}}$ zwischen 22 und 23 m. Wenn die gemäß Bild 2.8 sowie Formel (1) bzw. (2) kalkulierte Geschwindigkeit 35 km/h überschreitet, so wird gefordert, dass der Entwurf überarbeitet werden muss (V&W, 2009).

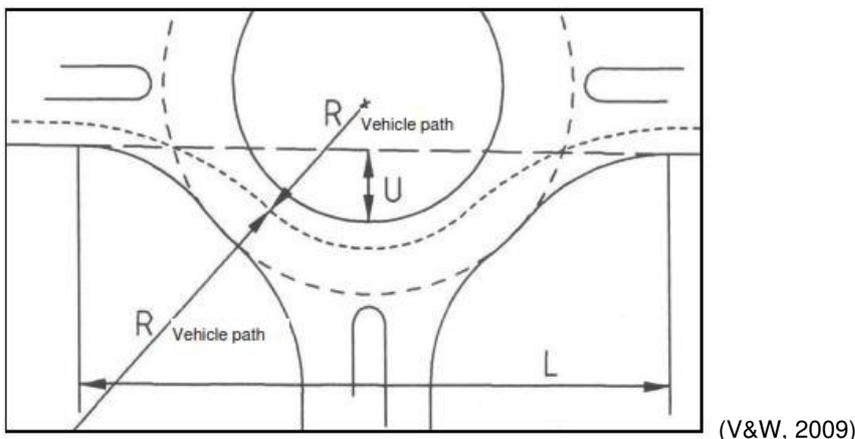


Bild 2.8: Niederländisches Entwurfsregelwerk: Maße zur Abschätzung des Geschwindigkeitsniveaus

$$R_{\text{Vehicle path}} = \frac{(0,25 \cdot L)^2 + (0,50 \cdot (U + 2))^2}{U + 2} \quad (1)$$

mit:

- $R_{\text{Vehicle Path}}$ = Radius einer idealisierten Fahrlinie [m]
- L = Abstand zwischen Beginn der Ausrundung der Zufahrt und Ende der Ausrundung der Ausfahrt [m]
- U = Ablenkung gemäß Bild 2.8

$$V = 7,4 \cdot \sqrt{R_{\text{Vehicle path}}} \quad (2)$$

mit:

$R_{\text{Vehicle Path}}$ = Radius einer idealisierten Fahrlinie [m]

V = Geschwindigkeit [km/h]

2.2.5 Fazit zu entwurfsgeometrischen Anforderungen im Ausland und Vergleich zu Deutschland

Zunächst lassen sich die verschiedenen Entwurfsrichtlinien anhand der Anlagengröße (Außendurchmesser) unterscheiden: Frankreich, Niederlande und Deutschland bieten die Möglichkeit, Kreisverkehre mit prinzipiell bis zu 50 m Außendurchmesser zu entwerfen, nur das schweizerische Regelwerk begrenzt dieses Maß auf maximal 40 m. Während das französische Regelwerk keine Einschränkungen für das Maximalmaß nennt, lassen die Niederlande zwar bis zu 50 m zu, empfehlen aber nicht mehr als 40 m, und in Deutschland gilt 50 m als „Obergrenze“ jenseits des Regel-Bereichs bis 45 m. Dies lässt die Vermutung zu, dass sich in Frankreich die tendenziell größten Kreisverkehrsanlagen finden lassen.

Weiterhin finden sich in Frankreich auch tendenziell die tangentialsten Zufahrten, während die Niederlande den größten Wert auf radiale Zufahrten legen. Die Schweiz nennt zwar „trichterförmige“ Fahrbahnteiler, verhindert aber über den Kontrollwinkel α übermäßig tangentielle Einfahrten. Werden diese Vorgaben mit den in den drei Regelwerken angegebenen Geschwindigkeiten verglichen, so fällt auf, dass bei Kreisverkehren in Frankreich mit den tangentialen Zufahrten sowohl die maximale Zielgeschwindigkeit von 50 km/h als auch der zugehörige Kontrollradius (100 m) deutlich über den vergleichbaren Maßen bei Kreisverkehren in den Niederlanden (Zielgeschwindigkeit 35 km/h, Kontrollradius 22 bis 23 m) und der Schweiz (Zielgeschwindigkeit zwischen 20 und 30 km/h) liegen.

In allen drei untersuchten Regelwerken aus dem europäischen Ausland existieren Angaben zu Ziel- bzw. Maximalgeschwindigkeiten. Diese sind in zwei von drei Fällen auch mit angestrebten Fahrlinienradien verknüpft, jedoch variieren die Werte je nachdem, ob eine eher tangentielle oder radiale Zufahrt angestrebt wird. Im deutschen Regelwerk finden sich indes keine Angaben für die Zieleigenschaften einer Fahrlinie. Nur in einem Diagramm wird ein „typischer Geschwindigkeitsverlauf an einem Kreisverkehr“ gezeigt, auf den jedoch textlich nicht näher eingegangen wird und der auch keinen Bezug zu Entwurfsgrößen hat. Dort ist eine minimale V_{85} von ca. 27 km/h ablesbar (vgl. Bild 5.3).

2.3 Literaturübersicht zu Unfalluntersuchungen an Kreisverkehren

2.3.1 Grundlagen zum Unfallgeschehen an Kreisverkehren

In der Literatur dominieren mengenmäßig Einbiegen-Kreuzen-Unfälle (EK-Unfälle), die gemäß der Einteilung im Merkblatt zur Örtlichen Unfalluntersuchung in Unfallkommissionen der FGSV (M Uko, 2012) dem Unfalltyp 3 zugeordnet werden, gefolgt von Fahrurfällen (Unfalltyp 1) und Unfällen im Längsverkehr vom Unfalltyp 6 (vgl. Tabelle 2.1). Ein Überblick über diverse Untersuchungen aus anderen Ländern zeigt, dass diese Verteilungen kein deutsches Spezifikum sind (ORSINI ET AL., 2018).

| Quelle | Kollektivgröße (Unfälle / Kreisverkehre) | Anteil Fahrurfälle (Unfalltyp 1) | Anteil EK-Unfälle (Unfalltyp 3) | Anteil Unfälle im Längsverkehr (Unfalltyp 6) |
|---------------------------|--|----------------------------------|---------------------------------|--|
| RICHTER UND HÜSKEN (1998) | 89 / 10 | 31 % | 47 % | 11 % |
| SPAHN UND BÄUMLER (2007) | 1.281 / 139 | ca. 43 % | (ca. 27 %)² | ca. 11 % |
| VIETEN ET AL. (2010) | 130 / 36 | 30,0 % | (54,6 %)³ | 11,5 % |
| REIFFER (2015) | 380 / 69 | 21 % | 52 % | 12 % |

Tabelle 2.1: Verteilung der Unfälle auf die maßgeblichen Unfalltypen in ausgewählten Untersuchungen

Fahrurfälle (Unfalltyp 1)

Fahrurfälle beschreiben Unfälle infolge eines Fehlers des Fahrzeugführers ohne Beeinflussung durch andere Verkehrsteilnehmer, die zum Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug führen. Im M Uko (2012) werden als Beispiele für diese Fehler „nicht angepasste Geschwindigkeit“ oder „falsche Einschätzung des Straßenverlaufs“ genannt. Werden diese Situationen auf einen Kreisverkehr übertragen, können sich die Folgen bspw. in einem Auffahren auf einen Fahrbahnteiler oder die Kreisinsel äußern (RICHTER UND HÜSKEN, 1998). Die Ursache für solche Unfälle ist folglich im Vorfeld oder im Bereich der Zufahrt zu vermuten: Das Fehlverhalten kann durch Defizite in der Anlage in diesem Bereich hervorgerufen oder verstärkt werden.

Einbiegen-Kreuzen-Unfälle (Unfalltyp 3)

Unfälle des Unfalltyps 3 (EK-Unfälle) an Kreisverkehren charakterisieren Kollisionen, die durch eine Missachtung der Wartepflicht eines auf die Kreisfahrbahn einfahrenden (einbiegenden) Fahrzeugs mit einem auf der Kreisfahrbahn fahrenden, bevorrechtigten Fahrzeug hervorgerufen werden. Diese Unfälle entstehen im Bereich der Kreiszufahrt desjenigen Verkehrsteilnehmers, der durch die Missachtung seiner Wartepflicht als Verursacher des Unfalls benannt wird.

² Es werden lediglich „Abbiegeunfälle“ aufgeführt; eine aggregierte Angabe von Typ 2 und 3 ist wahrscheinlich, der Anteil von Unfalltyp 2 dürfte an Kreisverkehren erfahrungsgemäß gering sein.

³ Unfalltypen 2 und 3 sind aggregiert angegeben, der Anteil von Unfalltyp 2 dürfte an Kreisverkehren erfahrungsgemäß gering sein.

Es bestehen dabei die grundsätzlichen Möglichkeiten, dass der Unfallverursacher das von links kommende Fahrzeug nicht sah – oder es sehr wohl sah, aber die Geschwindigkeit falsch einschätzte bzw. so nicht erwartete. Diese fehlerhaften Einschätzungen könnten z.B. durch eine dem Unfallverursacher nicht ersichtliche oder nicht bekannte, ausgesprochen zügige Zufahrtsmöglichkeit in der vorangegangenen Kreisverkehrszufahrt zumindest mit verursacht werden. In diesem Fall wäre ein Defizit in der baulichen Anlage in der der Unfallstelle vorgeschalteten Zufahrt (i.d.R. der direkt links liegende Arm) des Kreisverkehrs zu verorten. Ein weiterer Grund für Häufungen von EK-Unfällen kann in schlechten Sichtbedingungen im Bereich der Einfahrt nach links auf die Kreisfahrbahn liegen. Dies kann sich bei einem vergleichsweise spitzwinkligen Zufahrts- oder Aufstellverhalten einstellen, was bspw. durch ein großzügiges Ausrunden des rechten Fahrbahnrandes oder einen dreiecksförmigen, zur Kreisfahrbahn hin stark aufgeweiteten Fahrbahnteiler erklären lässt. Hier sind die beschriebenen Defizite in der baulichen Anlage des Kreisverkehrs an dem durch den Unfall betroffenen Kreisverkehrsarm selbst zu verorten.

Weiterhin ist es denkbar, dass EK-Unfälle auch durch eine vergleichsweise hohe Verkehrsbelastung, die die Verkehrsteilnehmer zum Annehmen auch geringer, letztendlich zu kleiner Zeitlücken auf der Kreisfahrbahn anregt, hervorgerufen werden können.

Unfälle im Längsverkehr (Unfalltyp 6)

Unfälle im Längsverkehr als „Konflikt zweier Verkehrsteilnehmer, die sich in gleicher oder entgegengesetzter Richtung bewegen“ (M Uko, 2012), sind in Kreisverkehren i.d.R. auf Gleichrichtungssituationen beschränkt und finden sich vor allem im Zufahrtsbereich. Darüber hinaus ist auch ein abruptes Abbremsen eines vorausfahrenden Fahrzeugs – z.B. zum Vermeiden eines Fahr- oder EK-Unfalls – möglich, infolgedessen ein nachfolgendes Fahrzeug auffahren kann. Der Grund für das Entstehen solcher Unfälle ist jeweils im entsprechenden Arm zu suchen. Unfälle im Längsverkehr auf der Kreisfahrbahn sind, da der Verkehr auf der Kreisfahrbahn Vorrang gegenüber den Einfahrten hat, systematisch nur dort zu verorten, wo an Ausfahrten (ggfs. sogar lichtsignalgeregelte) Fuß- und Radwegquerungen bestehen, die einen Rückstau bis auf die Kreisfahrbahn verursachen. In einem solchen Fall ist der Fehler weniger am Kreisverkehr selbst zu suchen, sondern evtl. in der Anordnung der Querung.

2.3.2 Vergleichende Unfalluntersuchungen in Deutschland

Die Datengrundlage von Unfallanalysen bilden i.d.R. Informationen aus den polizeilichen Unfallereignisprotokollen. Für Untersuchungen auf einer makroskopischen Ebene sind Kennwerte über alle Unfälle eines Kollektivs als vergleichende Kenngrößen entscheidend, insbesondere die Unfallkategorie, die die schwerste Unfallfolge beschreibt, und der Unfalltyp, der die unfallauslösende Konfliktsituation wiedergibt. Zusammen mit der durchschnittlichen täglichen

Verkehrsstärke (DTV, die Summe aller auf den Knotenpunkt zufahrenden Fahrzeuge) lässt sich daraus die Unfallrate UR (das Maß für die jährliche Anzahl der Unfälle pro 1 Mio. Kfz auf einem Streckenabschnitt bzw. einem Knotenpunkt) berechnen (vgl. Formel (3)).

Um neben der Anzahl auch die Schwere der Unfälle beurteilen zu können, werden die zuvor ermittelten Kenngrößen mit Unfallkosten verknüpft, die den „mittleren Schaden für einen Unfall eines bestimmten Kollektives“ (M Uko, 2012) je Kategorie angeben. Die kombinierten Unfallkenngrößen sind die Unfallkostenrate UKR (das Maß für die Unfallschwere in Bezug auf die Verkehrsmenge von 1.000 Kfz auf einem Streckenabschnitt, vgl. Formel (4)) und die Unfallkostendichte UKD (das Maß für die mittleren jährlichen Unfallkosten pro einem km Strecke). Für die Berechnung der Unfallrate bzw. der Unfallkostenrate an einem einzelnen Straßenelement ohne Längenbezug (wie z.B. im vorliegenden Fall an einem Kreisverkehr) können diese Kennwerte auch nur auf die Fahrleistung bezogen werden. Für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen von Kreisverkehren an Landstraßen außerorts sind daher auch nur diese beiden Kennwerte von Interesse und es gilt (vgl. M Uko, 2012; ESN, 2003):

$$UR = \frac{(10^6 \cdot U)}{(365 \cdot DTV \cdot t)} \quad (3)$$

mit:

- UR = Unfallrate [U/10⁶ Kfz]
- U = Anzahl Unfälle pro Jahr [U/a]
- DTV = Durchschnittlicher täglicher Verkehr [Kfz/24h]
- t = Betrachtungszeitraum [a]

$$UKR = \frac{(1.000 \cdot UK)}{(365 \cdot DTV \cdot t)} \quad (4)$$

mit:

- UKR = Unfallkostenrate [EUR/1.000 Kfz]
- UK = Unfallkosten pro Jahr [EUR/a]
- DTV = Durchschnittlicher täglicher Verkehr [Kfz/24h]
- t = Betrachtungszeitraum [a]

In der mikroskopischen Ebene werden für eine gezielte Betrachtung ausgewählte Eigenschaften einzelner Unfälle aus der polizeilichen Unfallerfassung hinzugezogen, wie z.B. Unfallarten. Zudem werden i.d.R. auch auf die konkrete Örtlichkeit bezogene Anlagenrandbedingungen mit ausgewertet.

2.3.3 Makroskopische Untersuchungen

In der ersten Phase der sogenannten „Kreisverkehrsrenaissance“ wurden zumeist unfallauffällige vorfahrtsregelte Knotenpunkte zu einem Kreisverkehr umgebaut, was i.d.R. zu einer deutlichen Reduktion der Unfallzahlen sowie einer Reduktion der Unfälle mit schwerem Personenschaden insgesamt wie auch anteilmäßig führte (vgl. z.B. RICHTER UND HÜSKEN, 1998). In Frankreich wurden nach Umbauten Rückgänge von 80 % (Anzahl der Unfälle mit Personenschaden) bzw. von 90 % (Unfälle mit Todesfolge) ermittelt (GAMBARD UND ALPHAND, 1991). In Dänemark konnte an 332 Knotenpunkten, die in den Jahren von 1995 bis 2009 zu Kreisverkehren umgebaut wurden, ein Absinken der Unfälle mit Todesfolge um 87 % beobachtet werden (JENSEN, 2013) .

Makroskopische Vergleichsuntersuchungen

Im Vergleich des Unfallgeschehens zwischen unterschiedlichen Knotenpunktarten zeigt sich, dass Kreisverkehre im Vergleich mit allen nichtsignalisierten Knotenpunktarten und allen Knoten mit Lichtsignalanlage (LSA), aber ohne Linksabbiegerschutz sowie im Vergleich zu signalisierten vierarmigen Knotenpunkten mit Linksabbiegerschutz deutlich geringere Unfallkostenraten und – etwas abgeschwächt – auch geringere Unfallraten aufweisen. Lediglich vollsignalisierte Einmündungen (mit Linksabbiegerschutz) schneiden sicherheitstechnisch besser ab als Kreisverkehre (VIETEN ET AL., 2010).

Diese auf ein umfangreiches Kollektiv gestützten Ergebnisse von VIETEN ET AL. bestätigen weitestgehend frühere Untersuchungen: Bspw. weist ein Kollektiv von sieben Kreisverkehren die insgesamt niedrigsten Unfallraten und Unfallkostenraten aller untersuchten Knotenpunktgrundformen (nach RAS-K-1) auf, wobei die Vergleichswerte für die übrigen Knotenpunkte jeweils anderen, vergleichbaren Untersuchungen entnommen wurden (RICHTER UND HÜSKEN, 1998). Die Unfallkostenraten sind dabei bis zu Faktor 7 geringer als diejenigen der plangleichen Knotenpunkte ohne LSA. Wenige Jahre darauf wurde dieses Kollektiv von ECKSTEIN UND MEEWES um drei weitere Kreisverkehre für eine größere Vergleichsuntersuchung außerörtlicher Knotenpunkte in Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen ergänzt. Die Unfallraten von Kreisverkehren sind dabei etwa mit denen von lichtsignalgeregelten Knotenpunkten mit Linksabbiegerschutz vergleichbar, die Unfallkostenraten fallen jedoch deutlich günstiger aus: Kreisverkehre sind in dieser Untersuchung zusammen mit Einmündungen mit LSA und Linksabbiegerschutz die deutlich sicherste Knotenpunktart. Die UKR von Kreuzungen mit LSA und Linksabbiegerschutz ist mehr als 2,5-mal so hoch (ECKSTEIN UND MEEWES, 2002).

Für Kreisverkehre außerorts in Deutschland können für die Unfallkennwerte UR und UKR somit folgende typische Größenordnungen gemäß den neueren Untersuchungen ermittelt werden (vgl. jeweils auch Tabelle 2.2):

- Unfallraten UR von rund 0,20 bis 0,40 U/10⁶ Kfz
- Unfallkostenraten UKR von rund 8,00 bis 9,00 EUR/1.000 Kfz.

| Quelle | Kollektivgröße (Unfälle / Kreisverkehre) | Unfallrate UR [U/10 ⁶ Kfz] | Unfallkostenrate UKR [EUR/1.000 Kfz] |
|---------------------------------------|---|--|---|
| ECKSTEIN UND MEEWES (2002) | 66 / 9 | 0,9 | 13,0 |
| SPAHN UND BÄUMLER (2007) ⁴ | ? / 54 (außerorts) | 0,39 (vierarmig) 0,46 (dreiarmlig) | 9,0 (vierarmig) 8,0 (dreiarmlig) |
| | ? / 85 (Ortsrand) | 0,32 (vierarmig) 0,17 (dreiarmlig) | 7,0 (vierarmig) 2,0 (dreiarmlig) |
| VIETEN ET AL. (2010) | 130 / 36 | 0,19 | 9,7 (pauschale UK) 8,7 (angepasste UK) |

Tabelle 2.2: Unfallraten und Unfallkostenraten an Kreisverkehren in ausgewählten Untersuchungen

Schwedische Kreisverkehre weisen in etwa identische Unfallanzahlen auf wie andere Knotenpunktarten. Die Unfälle an Kreisverkehren haben aber im Schnitt deutlich weniger schwerwiegende Unfallfolgen – im Gegenzug steigt die Anzahl als auch der relative Anteil der Unfälle mit geringfügigen Unfallfolgen, z.B. mit Sachschaden oder Leichtverletzten (CEDERSUND, 1988).

Teilweise finden sich solche Vergleichsuntersuchungen im Ausland im Anhang zu Regelwerken, z.B. in Frankreich: Im Jahr 1998 beträgt das Verhältnis nur noch sechs Getötete pro 100 Unfällen bei Kreisverkehren im Vergleich zu zehn von 100 bei allen anderen plangleichen Knotenpunkten (SETRA, 1998).

Makroskopische Untersuchungen zum Einfluss einzelner Entwurfsgrößen

Nur in wenigen der bisher veröffentlichten Untersuchungen werden konkrete Bezüge zu Entwurfsgrößen aufgestellt. Es konnte z.B. festgestellt werden, dass Kreisverkehre mit größerem Außendurchmesser, größerem Konfliktpunktstand und größeren, optisch und fahrdynamisch wirksamen Ablenkungen ein jeweils höheres Sicherheitsniveau bieten. Die Geschwindigkeiten bewegen sich dabei zwischen 30 und 38 km/h (RICHTER UND HÜSKEN, 1998).

Auf die deutsche Entwurfspraxis beziehend wurden im Jahr 2007 in Bayern 139 Kreisverkehre außerorts und an Ortsrändern hinsichtlich des Einflusses ausgewählter Entwurfs- und Gestaltungselemente auf das Sicherheitsniveau untersucht (SPAHN UND BÄUMLER, 2007). Bei Außerorts-Kreisverkehren konnte kein Bezug des Unfallgeschehens zur Anzahl der Kreisverkehrsarme festgestellt werden. Zusammenfassend werden Kreisverkehre mit „kleineren[n] Außendurchmessern[n] und schmalere[n] Fahrbahnen als sicherer“ benannt (ebd.). Ein Schwerpunkt der Untersuchung lag in einer Betrachtung der Zufahrt. Hierzu wurden die

⁴ Werte jeweils aus Schaubild abgelesen; insgesamt 1.281 Unfälle (vgl. Tabelle 2.1)

einzelnen Anlagen anhand ihrer Zufahrtsgestaltung in „radial“ oder „tangential“ unterschieden (vgl. Bild 2.9); es wird allerdings nicht auf die verwendeten Kriterien zur Abgrenzung eingegangen und offenbar wurde jeder Kreisverkehr ganzheitlich über alle Zufahrten eingeordnet. Bei radialen Zufahrten wird ein erhöhtes Gefährdungspotenzial vor allem bei großen Kreisradien („ein zügiges ‚Umkurven‘ der Kreisinsel ist damit [...] kritischer“) oder einer hohen Aufschüttung (Fahrerfälle durch ein Auffahren auf die Kreisinsel) erkannt (SPAHN UND BÄUMLER, 2007). Rückschlüsse auf spezifische Unfallkenngrößen in Abhängigkeit von den jeweils untersuchten Entwurfparametern sind nicht möglich, da die Einteilung global vorgenommen wurde.

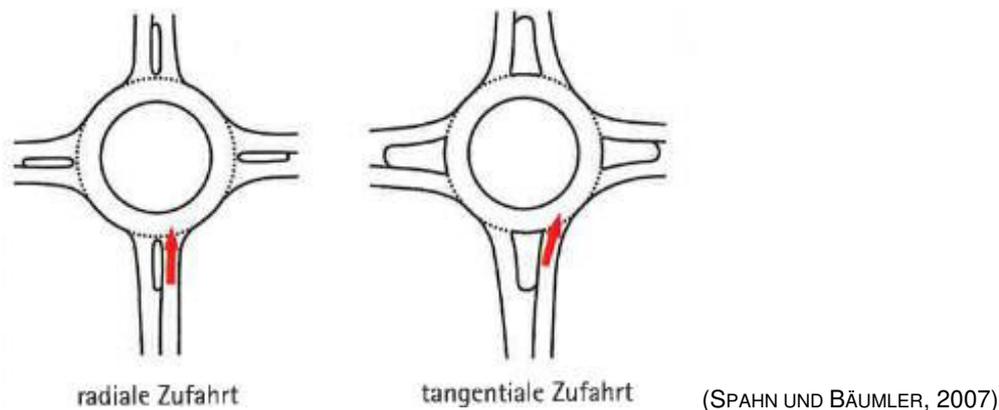


Bild 2.9: Unterscheidung der Zufahrtsgestaltung in „radial“ oder „tangential“

Deutlich wird in der vorgenommenen Auswertung allerdings, dass Kreisverkehre mit bestimmten Eigenschaften jeweils Unfälle mit schwereren Folgen in Form einer höheren Unfallkostenrate (UKR) aufweisen:

- Kreisverkehre mit einem Außendurchmesser von mehr als 40,0 m (ohne Bezug auf die Art der Zufahrt und die Kreisfahrbahnbreite)
- Kreisverkehre mit Kreisfahrbahnen breiter als 9,0 m (ohne Bezug auf die Kreisfahrbahnbreite oder Gesamtgröße der Anlage)
- Kreisverkehre, die größere Entwurfselemente aufweisen als im FGSV-Merkblatt von 1998 empfohlen wurde.

Alle drei Punkte nähren den Verdacht, dass diese Kreisverkehre infolge der großzügigeren Entwurfselemente schneller befahren werden können; dies wird aber nicht benannt. Darüber hinaus werden auch „abgekröpfte“ Zufahrten als allgemein kritisch bezeichnet (SPAHN UND BÄUMLER, 2007).

In Frankreich weisen Kreisverkehre mit einem Radius größer als 20,0 m (Außendurchmesser größer 40,0 m) deutlich höhere Unfallzahlen auf, übertroffen nur von ovalen Kreisverkehren, von denen auch explizit abgeraten wird (GAMBARD UND ALPHAND, 1991). Im französischen Regelwerk des SETRA (1998) finden sich Hinweise zum typischen Unfallgeschehen an Kreisverkehren und möglichen Ursachen. So lassen sich bspw. Unfälle durch Verlust der Fahrzeugkontrolle auf der Kreisfahrbahn feststellen, die sich etwa auf zu große Einfahrradien (die eine

zügige Einfahrt ermöglichen) oder unrunde Kreisinseln zurückführen lassen. Auffahrunfälle auf die Kreisinsel werden i.d.R. einer schlechten Annäherungssicht (auch nachts) zugeschrieben oder einer „Kurve-Gegenkurve-Konstellation“ im direkten Vorfeld; auch zu hohe Geschwindigkeiten werden erwähnt. Diese Unfälle haben oftmals die schwersten Folgen. Unfälle mit einer „Kollision“ zwischen einfahrenden und kreuzenden Fahrzeugen werden u.a. schlechten Sichtbedingungen vom Einfahrenden nach links oder einer „zu tangentialen Zufahrt“ zugeschrieben (SETRA, 1998).

An Kreisverkehren mit niedrigen Kreisinseln können in Dänemark mehr „Alleinunfälle“ (vermutlich den Fahrnfällen zuzurechnen) sowie „Heck-Unfälle“ (vermutlich Unfälle im Längsverkehr) verortet werden (JENSEN, 2014).

2.3.4 Mikroskopische Untersuchungen zum Unfallgeschehen an Kreisverkehren

Bei einer Unfalluntersuchung, die die Gestaltung des Kreisverkehrsvorfeldes betrachtet, wurde erkannt, dass eine auf den Kreismittelpunkt ausgerichtete Achse des zuführenden Fahrstreifens (nicht die Achse der Straße!), die eine vergleichsweise starke Lenkbewegung bei der Einfahrt erfordert, in Kombination mit einer sehr gestreckten, zu hohen Geschwindigkeiten verleitenden Linienführung gerade bei Dunkelheit vermehrt zu Fahrnfällen durch Auffahren auf die Kreisinsel führt (RICHTER UND HÜSKEN, 1998).

Gleichfalls sind allgemein überdurchschnittlich viele alkoholbedingte Unfälle zu verzeichnen. Oftmals sind dies Fahrnfälle durch Auffahren auf die Kreisinsel (in einer Untersuchung geschahen bspw. von 28 Fahrnfällen mit Auffahren auf die Kreisinsel fünf unter Alkoholeinfluss, also knapp 18 % (RICHTER UND HÜSKEN, 1998)).

ROOS UND ZIMMERMANN erstellten 2015 ein Gerichts-Gutachten (unveröffentlicht), in welchem sechs Kreisverkehre aus dem Landkreis Karlsruhe speziell zu Risiken untersucht wurden, die durch Kunstwerke auf der Kreisinsel (sogenannte „Kreiselkunst“) hervorgerufen werden können. Dies ist vor allem für Fahrnfälle von Bedeutung, wenn dabei ein Auffahren auf die Kreisinsel erfolgt. Sie erkannten in der zugehörigen Unfalluntersuchung an insgesamt 69 Kreisverkehren (20 innerorts, 21 am Ortsrand, 28 außerorts), dass 60 % aller Fahrnfälle bei Dämmerung bzw. Dunkelheit geschahen und dass umgekehrt „nahezu die Hälfte aller Unfälle bei Dunkelheit [...] Fahrnfälle sind, während sich deren Anteil ansonsten bei nur gut 20 % bewegt“ (ROOS UND ZIMMERMANN, 2015).

Neben anderen baulichen und gestalterischen Defiziten legen ROOS UND ZIMMERMANN ein starkes Augenmerk auf den sogenannten „Durchschusseffekt“. Sie charakterisieren ihn als „ungehinderte Sicht aus einer Knotenpunktzufahrt in eine gegenüberliegende Knotenpunktzufahrt“, was bei Kreisverkehren z.B. durch außermittig liegende Kreisinseln, sehr niedrige Kreisinseln (verstärkt in Wannens) oder starke Abkröpfungen der Zufahrten entstehen kann.

Ein Durchschusseffekt kann durch eine ungünstige optische Führung in der gegenüberliegenden Ausfahrt noch verstärkt werden; insgesamt wird der Durchschusseffekt als kritisches Defizit eingeordnet, da er ein „ungehindert mögliches Geradeausfahren“ suggeriere (vgl. ROOS UND ZIMMERMANN, 2015). Als Konsequenz können Fahrurfälle durch Auffahren auf die Kreisinsel hervorgerufen werden.

REIFFER (2015) unterschied das entsprechende Kollektiv der 69 Kreisverkehre im Landkreis Karlsruhe u.a. anhand ihres Außendurchmessers. Die EK-Unfälle sind etwa hälftig auf größere und kleinere Anlagen aufgeteilt, wodurch Indizien aufgezeigt wurden, dass es zumindest keinen unmittelbaren Zusammenhang zwischen Durchmesser und Unfallgeschehen gibt. Anlagen mit rechtwinkligen Zufahrten weisen zudem einen Anteil am Gesamtunfallgeschehen auf, der geringer ist als ihr prozentualer Anteil im Kollektiv, mithin sind sie als weniger unfallträchtig anzusehen. Darüber hinaus finden sich jedoch keine dezidierten mikroskopischen Untersuchungen zu EK-Unfällen, obwohl diese durchaus hohe Anteile am Gesamtunfallgeschehen einnehmen (vgl. REIFFER, 2015 bzw. Tabelle 2.1).

2.3.5 Unfallfolgen

Die Unfallfolgen werden nur selten differenziert betrachtet. Es findet sich bspw. die Angabe, dass Kreisverkehre mit „radialen Zufahrten“ mehr Unfälle mit schwerwiegenderen Unfallfolgen (vergleichsweise höhere UR und UKR) als solche mit „tangentialen Zufahrten“ hervorrufen, was vor allem mit einem „recht heftigen Aufprall“ auf die Kreisinsel begründet wird (SPAHN UND BÄUMLER, 2007). Als maßgeblich für diese Werte sind also hauptsächlich Fahrurfälle zu verstehen.

REIFFER (2015) gibt zudem an, dass bei 30 % der EK-Unfälle und 32 % der Fahrurfälle ein Personenschaden entstand (Schwer- bzw. Leichtverletzte).

Bei ECKSTEIN UND MEEWES (2002) wird zwar nicht nach Unfalltypen unterschieden, anhand der angegebenen Unfallanzahlen lässt sich jedoch ableiten, dass am betrachteten Kreisverkehrskollektiv ca. drei Viertel aller Unfälle mit einem leichten Sachschaden enden. Ein schwerer Personenschaden tritt nur einmal auf (dies entspricht 1,5 % aller Unfälle); für vorfahrts- oder lichtsignalgeregelte Knotenpunkte bzw. Einmündungen liegt dieser Wert bei 10 bis 18 %. Auch leichte Personenschäden haben bei Kreisverkehren mit knapp 11 % den geringsten Anteil, die anderen Knotenpunktarten liegen bis auf signalisierte Einmündungen (gut 11 %) bei etwa dem doppelten Anteil (rund 19 bis 21 %). Leichte Sachschäden treten an signalisierten Knotenpunkten mit Anteilen von 45 % an Kreuzungen bzw. 62 % an Einmündungen auf, an unsignalisierten betragen die Anteile 41 bzw. 54 % (ECKSTEIN UND MEEWES, 2002).

2.4 Statistische Untersuchungen zu Unfallgeschehen und Entwurf

In den zurückliegenden Jahren entstanden einige Veröffentlichungen in verschiedenen Ländern, in denen jeweils mit unterschiedlichen statistischen Methoden Zusammenhänge zwischen Unfällen an Kreisverkehren und den Geometrien der zugrunde liegenden Anlagen untersucht wurden. Eine der frühen, umfassenden Untersuchungen in diesem Bereich stammt aus Belgien (DANIELS ET AL., 2011). Das 148 Kreisverkehre umfassende Datenkollektiv ist allerdings recht durchmischt (ein- und zweistreifig befahrbare Kreisverkehre, u.a. acht ovale Anlagen, Lage sowohl inner- als auch außerorts). Die Unfälle werden – unterteilt in „Allein-Unfälle“ und „Unfälle mit mehreren Fahrzeugen“ – als mehrjähriger Durchschnittswert pro Anlage in der statistischen Auswertung als abhängige Variable eingesetzt. Für die „Allein-Unfälle“ konnte abgeleitet werden, dass die Anzahl steigt, wenn der Kreisinseldurchmesser zunimmt, und niedrig ist bei ovalen Kreisverkehren. Für „Unfälle mit mehreren Fahrzeugen“ lassen sich neben einer naheliegenden Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung nur Zusammenhänge mit nicht grundständigen Entwurfsaspekten von Kreisverkehren ableiten (DANIELS ET AL., 2011).

Ausschließlich bezogen auf Außerortskreisverkehre in Zentraleuropa (Polen, Tschechien, Slowakei und Ungarn) untersuchten AMBROS ET AL. (2016) statistische Zusammenhänge zwischen Unfallanzahlen und Verkehrsmengen bzw. Entwurfseigenschaften. Dabei verwendeten sie nur „typische“ Kreisverkehre, bspw. mit annähernd rechtwinkligen Zufahrtsachsen. Auch in diesem Fall werden Unfallkennwerte jeweils auf die gesamte Anlage bezogen, und es werden auch keine Unterschiede zwischen verschiedenen unfallauslösenden Konfliktsituationen (bspw. anhand von Unfalltypen o.ä.) betrachtet. Auf Seiten der abhängigen Antwort- bzw. Response-Variablen werden Unfallanzahlen in drei Kategorien angesetzt, aufgeteilt in Unfälle mit Sach- bzw. mit Personenschaden sowie Gesamtunfallanzahlen. Für die unabhängigen, erklärenden Variablen werden neben Ermittlung von Verkehrsmengen und den grundständigen Entwurfsparametern von Kreisverkehren jeweils ein Einfahr- und ein Ablenkungswinkel anhand einer Idealfahrlinie konstruiert, die, soweit es aus einer Abbildung erkennbar ist, jeweils in der Mitte der Zufahrt bzw. der Kreisfahrbahn verläuft; die Gestaltung des Übergangs ist nicht erläutert. In der Analyse werden für alle Parameter jeweils die Mittelwerte je Kreisverkehr verwendet.

Die anschließende Analyse mit Hilfe eines Unfall-Vorhersage-Modells (accident prediction model) wird zweigeteilt durchgeführt, zum einen anhand von vier länderspezifischen Kollektiven und zum anderen anhand des Gesamtkollektivs. Für beide Analysen wird angemerkt, dass sich für viele Entwurfsgrößen keine statistischen Zusammenhänge aufstellen lassen.

In den länderspezifischen Analysen wird erkannt, dass die Unfallzahlen steigen, wenn die Verkehrsmenge zunimmt, und dass die Unfallzahlen sinken, je größer der Außendurchmesser ist.

Breiter werdende „Einfahrweiten“ und schmaler werdende Kreisfahrbahnbreiten führen zu jeweils höheren Unfallzahlen. Die „kombinierte Betrachtung“ zeigt (neben entsprechenden Betrachtungen) für die Verkehrsmengen, dass die Unfallzahlen steigen, je größer der überfahrbare Innenring ist, und dass sie sinken, je größer die Ablenkung ist (AMBROS ET AL., 2016).

Australische Forscher stellten 2018 eine weitere Studie zu statistischen Abhängigkeiten von Unfällen und Kreisverkehrsinfrastruktur auf; daneben bietet diese Studie auch einen ausführlichen Überblick über die zwischenzeitlich auf diesem Gebiet erarbeiteten Zusammenhänge. Es kann anhand der Angabe, dass „regional roundabouts in Toowoomba City“ in die Untersuchung einbezogen wurden, davon ausgegangen werden, dass es sich dabei schwerpunktmäßig um Kreisverkehre innerhalb oder im Vorfeld bebauter Gebiete handelt. Für die Infrastrukturanalyse wurden u.a. anhand von idealisierten Fahrlinien erstellte Einfahr- und Ausfahrradien verwendet; diese Fahrlinien schmiegen sich zwar bei der Ein- und Ausfahrt an die Außenränder der Infrastruktur an, liegen auf der Kreisfahrbahn aber in der Mitte. Neben diversen Abhängigkeiten erkennen sie für größer werdende Einfahrradien sinkende und für größer werdende Ausfahrradien steigende Unfallanzahlen (AL-MARAFI ET AL., 2018) .

In Anbetracht dieser Ergebnisse erscheint es sinnvoll, Unfall- und/oder Kreisverkehrsdaten um neue Aspekte zu erweitern, um vertiefte Kenntnisse zu erlangen. Eine Möglichkeit besteht in der Anwendung von Fahr simulatoren. So untersuchten bspw. ORSINI ET AL. (2018) auf der Basis eines nachtrassierten innerstädtischen Kreisverkehrs aus der Region Padua das Fahrverhalten beim Einfahrtvorgang mit Hilfe der Time-To-Collision-Methode, welches statistische Modell sich am besten für eine Vorhersage von Unfällen eignet. Da diese Studie nur an einem Kreisverkehr durchgeführt wurde, beinhaltet sie keine Rückschlüsse auf unterschiedliche Auswirkungen der Infrastruktur (ORSINI ET AL., 2018).

2.5 Fazit zu Entwurfskriterien und Unfallgeschehen

Zusammenfassend kommen alle Untersuchungen zu der übereinstimmenden Erkenntnis, dass Kreisverkehre grundsätzlich sichere Anlagen sind. Dies gilt ganz offensichtlich für Kreisverkehre insgesamt, wie sie nach den in den unterschiedlichen länderspezifischen Regelwerken abgebildeten Entwurfsphilosophien dimensioniert und gebaut werden. Die Anzahl aller Unfälle an Kreisverkehren ist im Vergleich zu vorher dort bestehenden Kreuzungen bzw. Einmündungen oder im Vergleich verschiedener Knotenpunktarten untereinander in etwa gleich oder etwas geringer. Deutliche Rückgänge sind für Unfälle mit Personenschaden und – noch ausgeprägter – für Unfälle mit Todesfolge zu verzeichnen. Daraus ist abzuleiten, dass an Kreisverkehren etwa die gleiche oder eine leicht gesunkene Anzahl an Unfällen auftritt, allerdings weisen davon viele Unfälle weniger schwerwiegende Unfallfolgen auf.

Bei einer differenzierten Betrachtung wird erkennbar, dass EK-Unfälle zumeist den größten Anteil aller Unfälle ausmachen. Besonders schwere Unfallfolgen treten hingegen vor allem bei Auffahrunfällen auf die Kreisinsel auf; dies sind Unfälle vom Typ Fahrnfall.

Bei den vorliegenden Studien muss beachtet werden, dass Kreisverkehre innerorts und außerorts fast immer in freier Kombination miteinander untersucht wurden (bezogen auf deutsche Entwurfskriterien betrifft dies insbesondere RICHTER UND HÜSKEN (1998) sowie ECKSTEIN UND MEEWES (2002), obwohl gerade das deutsche Entwurfsregelwerk mit dem nur innerorts vorgesehenen Innenring variierende Entwurfskonstellationen vorsieht – ein baulicher Innenring kann bspw. die Breite einer für Pkw zu nutzenden Kreisfahrbahn mindern, ist aber befahrbar und kann darüber hinaus eine bessere Durchsicht in die gegenüberliegende Ausfahrt und somit einen „Durchschusseffekt“ hervorrufen). Darüber hinaus unterscheiden sich u.a. auch Verkehrszusammensetzung und Geschwindigkeitsniveau, was sich auf die Ergebnisse der Untersuchungen auswirken kann.

Die Studie von AMBROS ET AL. (2016) bestätigt, dass die Ablenkung ein wichtiges Maß für die Sicherheit von Kreisverkehren ist. Bei den ebenfalls als sicherheitsfördernd ermittelten größeren Außendurchmessern lässt sich eine größere Ablenkung der Fahrlinie auch leichter bewerkstelligen. Allerdings wird diese Ablenkung dort an Fahrlinien orientiert, deren Konstruktion unklar ist; anschaulich liegen sie jeweils in der Fahrstreifen- bzw. Kreisfahrbahnmitte.

Die in den allermeisten Studien nicht klar durchgeführte Trennung von Innerorts- und Außerortsanlagen beeinträchtigt im vorgesehenen Untersuchungsrahmen eine nicht hinterfragte Nutzbarkeit der jeweiligen Ergebnisse: Neben unterschiedlichen Entwurfsrandbedingungen vor allem in Bezug auf die unterschiedliche Verkehrszusammensetzung und das andere Niveau der Ausgangsgeschwindigkeiten. Da in allen Fällen die Kreisverkehre „im Ganzen“ untersucht wurden, wurden die Unfälle (zumeist als Anzahl) auf den Kreisverkehr an sich bezogen und für Parameter, die in jeder Zufahrt einzeln auftreten (bspw. die Breite der Kreiszufahrt), ein Mittelwert gebildet. Durch die Verwendung von Mittelwerten kann aber der möglicherweise hohe Einfluss von spezifisch gestalteten Zufahrten verschwimmen.

Bezogen auf die tlw. in internationalen Untersuchungen verwendeten „idealisierten Fahrlinien“ in Fahrstreifenmitte stellt sich die Frage, inwieweit diese gerade auf der Kreisfahrbahn der Realität entsprechen.

Daher erscheint es grundsätzlich geboten, bei Kreisverkehren ein besonderes Augenmerk auf die Gestaltung und Anordnung der Zufahrten zu legen, da die beobachteten Unfälle zu einem ganz überwiegenden Teil dort zu verorten sind und in diesem Bereich im Entwurf auch seitens des Regelwerks vergleichsweise große Gestaltungsspielräume bestehen. Die beiden häufigs-

ten Unfalltypen (Fahrerunfälle und EK-Unfälle) sind auf jeweils verschiedene Fahrverhaltensweisen bzw. -fehler zurückzuführen, was auf mindestens zwei Untersuchungsaspekte hindeutet und darüber hinaus auch das tatsächliche Fahrverhalten für weitere, empirische Untersuchungen interessant macht.

2.6 Weiterführende Überlegungen

2.6.1 Einflüsse aus den Fahrrelationen

An Kreisverkehren herrschen offensichtlich in Abhängigkeit von der Gestaltung der Anlage unterschiedliche Fahrverhaltensweisen vor, die dann wiederum ein unterschiedliches Fahrverhalten auch in Bezug auf die jeweiligen Fahrrelationen (sinngemäße Rechtsabbieger, Geradeausfahrer oder Linksabbieger) bewirken. Es stellt sich die Frage, ob es bestimmte kritische, unfall- oder konfliktbegünstigende Fahrverhaltensweisen gibt und ob bzw. wie diese identifiziert werden können.

Grundsätzlich sind Fahrten immer dann besonders kritisch, wenn der Kreisverkehr bzw. Knotenpunkt nicht als solcher erkannt wurde, da einer Durchfahrt die Kreisinsel als physisches Hindernis entgegensteht. Hieraus resultieren – möglicherweise unabhängig von der geometrischen Gestaltung des Kreisverkehrs – i.d.R. Fahrerunfälle. Unabhängig von einem (zu) späten Erkennen o.ä. können an jeder Zufahrt vor allem diejenigen Fahrrelationen risikobehaftet sein, die mit höheren (als den eigentlich zgedachten und somit geeigneten) Geschwindigkeiten befahren werden können.

Als besonders anfällig für beide vorgenannten risikobehafteten Situationen werden Fahrten in der Geradeaus-Richtung (200-gon-Durchfahrt bei regelmäßigen Kreisverkehren) gesehen: Zunächst unterscheiden sich die Fahrgeschwindigkeiten zwischen einer Geradeausdurchfahrt an einem plangleichen Knotenpunkt – zumindest im Verlauf der vorfahrtsberechtigten Straße – und einem Kreisverkehr sehr deutlich. Wenn bspw. auf einen Knotenpunkt zugefahren wird, der zwar als Knoten, nicht aber (bzw. nicht rechtzeitig) als Kreisverkehr erkannt wurde, sind starke Bremsmanöver zu bewältigen. Weiterhin ist augenscheinlich für die Geradeaus-Durchfahrt an regelmäßig gestalteten Kreisverkehren die geringste aufsummierte Richtungsänderung in Bezug zur Durchfahrtslänge zu absolvieren, was ein vergleichsweise höheres Geschwindigkeitsniveau zur Folge haben kann. Schon kleinere Geometrieänderungen können jedoch auch das Maß der erforderlichen Richtungsänderung beeinflussen – sowohl positiv als auch negativ. Möglicherweise neigen Fahrer auch (unterbewusst) dazu, die Fahrt in Geradeaus-Richtung mit einem möglichst geringen Geschwindigkeitsverlust im Vergleich zur Geschwindigkeit der freien Strecke zu absolvieren, was womöglich verstärkend wirkt, wenn die Geschwindigkeitsminderung nicht deutlich als Erfordernis durch die Anlage manifestiert wird.

Die Geradeaus-Durchfahrt ist also anfällig für Einflüsse aus dem Zusammenspiel der Entwurfskriterien und daher als Untersuchungsgegenstand von hohem Interesse: Einerseits schlagen sich die Auswirkungen von Änderungen z.B. an der Geometrie hier sehr deutlich nieder, andererseits ist diese Fahrbeziehung am anfälligsten für hohe Geschwindigkeiten. Nicht umsonst beziehen sich (außer dem Winkel α im schweizerischen Regelwerk, vgl. 2.2.2) alle Prüfgrößen auf die direkte Geradeaus-Richtung.

Sinngemäß rechtsabbiegende Fahrten (100-gon-Durchfahrt eines regelmäßigen Kreisverkehrs) werden mitbetrachtet, da sich die Ideallinie für rechtabbiegende Fahrzeuge deutlich von derjenigen der Geradeausfahrer unterscheidet: Sie beschreibt einen Kreisbogen ohne Gegenlenken und orientiert sich entsprechend an anderen Bezugskanten der Kreisverkehrsanlage. Auch wenn rechtsabbiegende Fahrzeuge durch ihre unmittelbar folgende Ausfahrt mit keinem weiteren einfahrenden Kreisverkehrsstrom in Konflikt geraten, so können sie im Moment der Einfahrt auf von links kommende Fahrzeuge auf der Kreisfahrbahn treffen. Risikobehaftete Situationen durch einen Rechtsabbieger sind weiterhin z.B. dann vorstellbar, wenn die fahrbaren Geschwindigkeiten von Rechtsabbiegern und Geradeausfahrern aus der gleichen Zufahrt im Moment der Einfahrt auf die Kreisfahrbahn deutlich voneinander abweichen.

Aufgrund dieser Überlegungen sind sinngemäß linksabbiegende Fahrzeuge (etwa 300-gon-Durchfahrt bei regelmäßigen Kreisverkehren) nicht relevant, da sie durch die Umrundung der Kreisinsel fahrgeometrisch sehr angepasst und somit tendenziell recht langsam fahren müssen. Da Linksabbiegen immer mit erhöhtem Lenkaufwand wie auch Risiko verbunden (da immer mindestens in Bezug auf einen anderen Strom mit verkehrlichem Nachrang versehen) ist, wird eine defensivere Fahrweise im Vorfeld des Knotenpunktes vermutlich auch dann angewendet, wenn bereits bekannt ist, dass links abgebogen werden soll und gleichzeitig nicht bekannt ist, dass der kommende Knotenpunkt als Kreisverkehr gestaltet ist.

2.6.2 Einflüsse aus den Zufahrten

Wird das Fahrverhalten an Kreisverkehren betrachtet, so sind auch die Auswirkungen aus dem Zusammenspiel der Entwurfselemente im Zufahrts- bzw. Einfahrtsbereich auf das Fahrverhalten zu analysieren. Hier können vielfältige Konstellationen auftreten, die zumeist anhand typischer Ausprägungen als „radial“ bzw. „tangential“ bezeichnet werden (vgl. Bild 2.9). Zwischen einer deutlich radialen und einer deutlich tangentialen Zufahrt sind differenzierte Abstufungen möglich; weiterhin gibt es auch Mischformen, indem sich z.B. eine zunächst deutlich radiale Zufahrt zum Kreisverkehr hin tangential aufweitet.

Auch die Achsausrichtung der Zufahrt kann einen Einfluss auf das Fahrverhalten ausüben: Je mehr die Zufahrtsachse vom Kreismittelpunkt nach rechts abweicht, desto geringer wird der Ablenkungseffekt durch die Kreisinsel bei der Geradeausfahrt. Wichtig ist hierbei, dass nicht

(nur) die Fahrbahnachse des Kreisverkehrsarmes betrachtet wird, sondern (auch) die Achse der Zufahrt; dies gilt insbesondere bei breiten bzw. breiter werdenden Fahrbahnteilern.

Bei tangentialen Zufahrten erfährt die Zufahrtsachse im Vorfeld des Kreisverkehrs stetig zunehmend mehr Abstand zur Straßenachse, wodurch ein wertemäßiger Bezug zur Kreisinsel (Ablenkung) bzw. dem Kreismittelpunkt schwierig zu fassen ist. Eine tangentiale Führung „verbraucht“ also einen bestimmten Anteil der Ablenkung bereits vor der Kreiseinfahrt. Für sehr tangentiale Zufahrten ist die Ablenkung somit nicht sinnvoll ermittelbar, bzw. es wäre für diese Fälle erforderlich, die Ablenkung bezogen auf eine (zumindest einigermaßen) einheitliche Durchfahrtslänge durch den Kreisverkehr zu bestimmen. Geeignet erscheint zudem eine Ausgangsposition des Fahrzeuges etwa rechtwinklig zur Kreisfahrbahn (so wie es das Regelwerk grundsätzlich vorsieht, vgl. Bild 2.4).

Außerdem sind Sonderfälle zu beachten: Liegt der Mittelpunkt der Kreisinsel deutlich versetzt zu einer zuführenden Achse (sog. „außermittige Kreisinsel“), entsteht in einer Fahrbeziehung ein „Durchschusseffekt“; eine Ablenkung kann in solchen Fällen oftmals nicht mehr bestimmt werden. Tlw. werden Straßen mit außermittigen Zufahrtsachsen vor Kreisverkehren „abgekröpft“, um zumindest im unmittelbaren Knotenpunktbereich eine annähernd auf den Kreismittelpunkt ausgerichtete Zufahrt zu erhalten. Eine solche Abkröpfung unterliegt keinen spezifischen Regelwerksvorgaben, insbesondere bei „engen“ Ausführungen können infolge der zu beachtenden Schleppkurven recht aufgeweitete Einfahrbereiche entstehen, die verschiedene Fahrverhaltensweisen bis hin zu einem „Durchschusseffekt“ zulassen und rechnerische Ablenkungen konterkarieren. Zudem führt eine Abkröpfung oftmals zu Schwierigkeiten bei der systematischen Bestimmung von Prüfgrößen wie etwa dem Ablenkmaß.

Fazit

Die Zufahrtsgestaltung kann einen erheblichen Einfluss auf die Ablenkung durch die Kreisinsel ausüben: Bspw. kann durch die Achsausrichtung die Ablenkung konterkariert oder das rechnerische Ablenkmaß durch tangentiale Zufahrten früher durch die Fahrlinie aufgenommen und somit auf eine größere Streckenlänge gedehnt werden. Beide Varianten führen insgesamt zu einer gestreckten Fahrlinie, die vergleichsweise zügiger befahren werden kann.

2.6.3 Untersuchungsrandbedingungen

Zufahrtsgenaue Betrachtung

Es ist wenig sinnvoll, Kreisverkehre „global“ zu betrachten, da die Anlagen selten symmetrisch aufgebaut sind. Angesichts der Vielzahl vorhandener Entwurfskonstellationen erscheint es nicht durchführbar, ein einfaches, über alle Kreisverkehrsarme hinweg gültiges Unterteilungs-

schema zu erstellen und anzuwenden. Zudem sind Schwierigkeiten zu erwarten, Ausprägungen wie bspw. „radial“ und „tangential“ wertemäßig zu erfassen. Schon kleinere Abweichungen in einer Zufahrt können das Fahrverhalten und damit auch das Unfallgeschehen spezifisch beeinflussen. Möglicherweise kann ein besonderes Gefährdungspotenzial von solchen Kreisverkehren ausgehen, die durch unterschiedliche Zufahrten ein für die Verkehrsteilnehmer insgesamt schwer abschätzbares Verhalten hervorrufen.

Daher werden alle Zufahrten und ihre Geometrie separat betrachtet.

Beschränkung auf Außerorts-Kreisverkehre

Die vorliegende Arbeit wird sich im Folgenden ausschließlich mit Kreisverkehren befassen, die Außerortssituationen zugeordnet werden können. Kreisverkehre im Vorfeld bebauter Gebiete werden mitbetrachtet, wenn sie insgesamt und bezüglich der betrieblichen Randbedingungen (z.B. Lage in Bezug zur Bebauung) einen Außerortscharakter aufweisen. Hierzu gehört der Verzicht auf Fußgängerüberwege über die Fahrbahnteiler oder i.d.R. auf einen Innenring. Dies kann bspw. relevant sein, wenn infolge von Siedlungswachstum die Bebauung an oder gar über einen Kreisverkehr hinweg gewachsen ist.

2.7 Fazit für die folgenden Untersuchungsschritte

Aus der Literaturanalyse und den darauf basierenden eigenen Überlegungen ergibt sich ein Vertiefungs- bzw. Konkretisierungsbedarf in folgenden Punkten:

- Betrachtung von Kreisverkehren außerorts: Hier sind die Differenzen zwischen den Geschwindigkeiten im Kreisverkehr und der freien Strecke am größten.
- Zufahrtsgenaue Unfalluntersuchungen an Kreisverkehren mit weiterer Differenzierung zu Unfalltypen und -kategorien: Nur so ist es möglich, Einflüsse aus den sich überlagernden Randbedingungen (Entwurf, beteiligte Verkehrsteilnehmer etc.) herauszuarbeiten und z.B. die Stärke des Einflusses zu bestimmen.
- Zufahrtsgenaue Untersuchungen zum Fahrverhalten: Auf der Basis der als besonders kritisch erarbeiteten Geradeaus-Durchfahrten ist das Fahrverhalten der Fahrzeuge im Kreisverkehr hinsichtlich der Form der Fahrweise (abgebildet durch „Fahrlinieninformationen“) sowie hinsichtlich des Geschwindigkeitsverhaltens zu untersuchen. Ob auch Rechtsabbieger-Durchfahrten kritisch sind, ist zudem zu prüfen.

Ziele der folgenden Untersuchungsschritte sind also, zunächst Abhängigkeiten von Fahrweise und Entwurfsgeometrie zu erarbeiten, darauf aufbauend Rückschlüsse auf die Verkehrssicherheit zu ermitteln und zuletzt Entwurfshinweise für möglichst sichere Kreisverkehre abzuleiten.

3 Untersuchungsdesign

3.1 Methode der Unfalluntersuchung (Kapitel 4)

In der Literaturanalyse wurde festgestellt, dass bislang keine Unfalluntersuchung vorliegt, in der die einzelnen Zufahrten mit ihren jeweiligen spezifischen Entwurfskonstellationen separat betrachtet werden, obwohl sich das Unfallgeschehen an Kreisverkehren schwerpunktmäßig auf die Zufahrten zurückführen lässt (vgl. hierzu auch Kapitel 9.2.6). In der hier anstehenden Unfalluntersuchung wird daher zufahrtsgenau das Unfallgeschehen an Kreisverkehren mit den jeweiligen entwurfsgeometrischen Randbedingungen überlagert.

Entwurfsanalyse

An einem Kollektiv außerörtlicher Kreisverkehre werden zunächst die maßgeblichen Entwurfs-eigenschaften herausgearbeitet. Hierunter fallen

- die grundlegenden Entwurfsgrößen, die sich an jedem Kreisverkehr wiederfinden und z.B. aus Entwurfslageplänen direkt mess- oder ablesbar sind,

sowie

- Verhältniswerte, Winkel, Abstände von Elementgrenzen o.ä., die beim eigentlichen Entwurf nicht vordergründig eingesetzt werden, sondern aus dem Zusammenspiel der Einzelgrößen entstehen und somit innerhalb des Kreisverkehrs bzw. über die einzelnen Zufahrten hinweg variieren können.

Unfallanalyse

Am gleichen Kollektiv wird eine eigene zufahrtsgenaue Unfallanalyse durchgeführt. Nur Unfälle mit Zufahrts-Bezug gehen in diese Untersuchung ein.

Während makro- und mikroskopische Unfalluntersuchungen ohne DTV-Bezug an einem größeren Kollektiv durchgeführt werden, werden an einem Teil des Kollektivs, für den die vollständige DTV-Belastung bekannt ist, die Unfalluntersuchungen vertieft.

Überlagerung von Unfall- und Entwurfseigenschaften, Hypothesenüberprüfung

Anhand der anschließenden Überlagerung von Unfall- und Entwurfseigenschaften wird überprüft, in wie weit einzelne geometrische Entwurfsgrößen oder Entwurfskonstellationen für das Unfallgeschehen maßgeblich sind. Durch die Überlagerung mittels einer Regressionsanalyse wird gezeigt, dass einzeln betrachtete Geometriemerkmale nur einen geringen Einfluss ausüben. Es wird daraus abgeleitet, dass vielmehr das durch die Anlagengeometrie resultierende

fahrdynamisch (schlimmst-)mögliche Fahrverhalten jeweils Unfälle hervorruft; der größte Einfluss ist also bei der Fahrlinie zu finden. Das tatsächliche Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer ist daher im Folgenden vertieft zu untersuchen.

3.2 Methode der Fahrlinienuntersuchung (Kapitel 5)

3.2.1 Allgemeines

Von Interesse ist das Fahrverhalten in denjenigen Relationen, in denen fahrdynamische Aspekte vorkommen können. An Kreisverkehren sind das vor allem sinngemäß geradeaus fahrende Fahrzeuge. Prägende Aspekte des Fahrverhaltens werden in den Bereichen Lenk- und Geschwindigkeitsverhalten verortet.

Um dies analysieren zu können, müssen Informationen zur Form der Fahrlinie (als Weg-Koordinaten) zur Verfügung stehen; darüber hinaus ist eine Zeit-Information („Zeitstempel“) zu den Koordinaten erforderlich, um Geschwindigkeiten sowie ggfs. Verzögerungen und Beschleunigungen ableiten zu können. Es ist also eine stetige Beobachtung von Fahrzeugen während der Durchfahrt durch den Kreisverkehr erforderlich. Zudem muss ein Bezug zur Kreisverkehrsinfrastruktur in der Lageplanebene hergestellt werden.

3.2.2 Gewählte Technik der luftgestützten Videodatenerhebung

Die Fahrlinien von Fahrzeugen können grundsätzlich mit Video- oder Radarsystemen erhoben werden; dazu können terrestrische oder luftgestützte Methoden eingesetzt werden.

Mit beiden technischen Systemen können Messungen an bestimmten, diskreten Stellen oder Querschnitten vorgenommen werden, wohingegen sich Videobeobachtungen auch über einen Bereich hinweg erstrecken und Änderungen bzw. Entwicklungen dynamisch dargestellt werden können. Da zu erwarten ist, dass sich bestimmte Ereignisse, wie etwa Wendepunkte von Fahrlinien oder Eigenschaften von Beschleunigungen, nicht auf bestimmte Querschnitte der Kreisverkehrsinfrastruktur festlegen lassen, wird angestrebt, möglichst lückenlose Verläufe von Fahrlinien und Geschwindigkeiten auszuwerten, womit Messungen an diskreten Querschnitten ausscheiden. Die Wahl fällt somit auf ein videogestütztes System.

Terrestrische Erhebungsmethoden weisen den Nachteil auf, dass infolge der Perspektive starke Verzerrungen auftreten können. Zudem ist nicht gewährleistet, dass die Erfassung des gesamten Kreisverkehrs von einem Standort aus zu bewältigen ist (z.B. Sichtverdeckungen). Dadurch können mehrere Messgeräte notwendig werden, was allerdings eine interne Synchronisation der Geräte zur Ermittlung durchgängiger Geschwindigkeitsverläufe erfordert; dies wiederum bildet eine potenzielle Quelle von Ungenauigkeiten an einer sensiblen Stelle. Weiterhin können durch Mess- oder Aufnahmegeräte, die sich im Blickfeld von Fahrzeugführern

befinden, diese ablenken und das Ergebnis verfälschen; nicht zuletzt sind bei terrestrischen videogestützten Methoden umfangreiche Datenschutz-Anforderungen zu erwarten.

Bei Videoaufnahmen aus der „Vogelperspektive“ entfällt nicht nur der Datenschutzaspekt, diese Perspektive bietet zudem den Vorteil, dass die Bewegungsebene und somit Fahr- und Geschwindigkeitsverläufe der Fahrzeuge ohne Verdeckungen lückenlos abgebildet werden können. Durch eine ausreichende Höhe der Aufnahmeposition sind auch Betrachtungen in den vorgelagerten Zufahrtsbereichen möglich. Da die Aufnahmen die Lageebene abbilden, sind detailgenaue Rückschlüsse zwischen dem Fahrverhalten und der Infrastruktur möglich. Die Maßstabstreue wird über einzumessende Referenzpunkte gewährleistet.

Solche Aufnahmen können mit einem UAV (unmanned aerial vehicle = unbemanntes Flugobjekt; „Drohne“) angefertigt werden. Die erhobenen Videosequenzen sind für eine DV-gestützte Auswertung an einem Rechner geeignet. Der Zielerreichungsgrad von luftgestützten Videoaufnahmen mit einem UAV wird als sehr hoch angesehen, weshalb diese Erhebungsmethode gewählt wird.

3.2.3 Erzeugen von Fahrzeugtrajektorien und weitere Datenverarbeitung

Das gewählte Verfahren gehört zum Fachgebiet der Fotogrammetrie (einem Teilgebiet der Fernerkundung). Die Fotogrammetrie allgemein umfasst Auswerteverfahren, um aus Fotoaufnahmen Informationen zu Lage, Form etc. der abgebildeten Gegenstände auslesen zu können. Solche Verfahren lassen sich auch auf Videoaufnahmen anwenden, um aus der Bildfolge das Bewegungsverhalten von Objekten anhand der Pixelkoordinaten im Bild nachvollziehen zu können.

Von den Videos wird eine möglichst dichte Folge der Frames (Einzelbilder der Filmsequenz) ausgewertet, um anhand der Weg- bzw. Zeit-Koordinaten Fahr- und Geschwindigkeitsverläufe erstellen zu können. Die Bewegungen werden pixelscharf ermittelt, indem jedes Pixel des auszuwertenden Videoframes auf Farbänderungen im Vergleich zum vorherigen Videoframe überprüft wird. Durch die Lage der Farbänderungen lässt sich die Bewegung von Objekten von Frame zu Frame nachvollziehen. Die geometrische Entzerrung innerhalb der Aufnahmen wird über Bildkoordinaten und fest einzumessende Referenzpunkte in einem lokalen Koordinatensystem bestimmt. Alle Videoaufnahmen werden zudem zum Ausgleich der Bewegungen des UAV in der Luft stabilisiert.

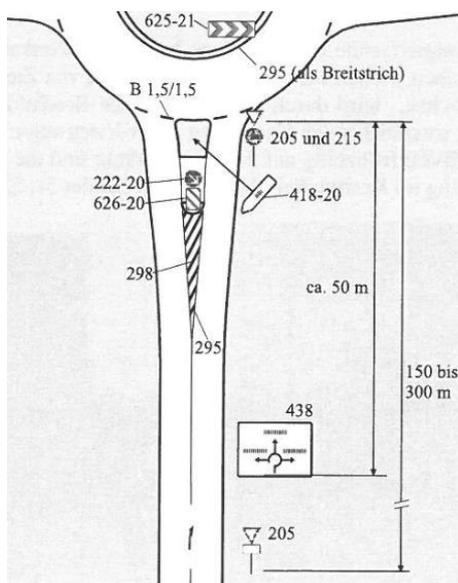
Die Ausgabedatei wird anschließend aufbereitet und weiterverarbeitet, um die verschiedenen Verläufe grafisch darzustellen und mit weiteren Informationen zur Auswertung anzureichern.

4 Zufahrtsgenaue Unfalluntersuchung an Kreisverkehren

4.1 Allgemeines

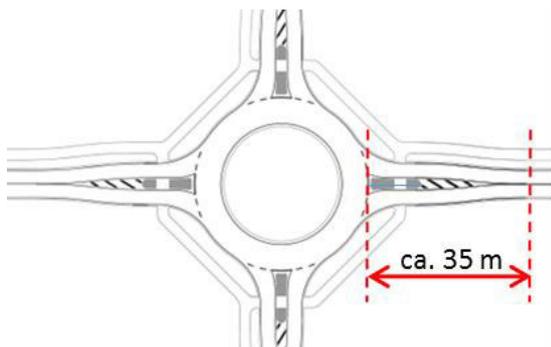
Die zufahrtsgenaue Untersuchung vereint verkehrliche (DTV, Unfälle; vgl. Kapitel 4.2) sowie entwurfsgeometrische Eingangsgrößen (vgl. Kapitel 4.3). Die Unfallanalyse erfolgt gestaffelt an zwei verschiedenen Kollektiven (vgl. Kapitel 4.4 und 4.5), anschließend werden Zusammenhänge zwischen Unfallgeschehen und Entwurfsgeometrie untersucht (vgl. Kapitel 4.6).

Einen „Beginn“ der Zufahrt zu definieren, um bspw. die Festlegungen aus Kapitel 1.2 zahlenmäßig besser fassen zu können, ist im Übrigen nicht erforderlich. I.d.R. erfolgt vor dem Fahrbahnteiler in Fahrbahnmitte ein Übergang von einer gelückten Leitlinie (StVO-Zeichen 340) auf eine durchgezogene Warnlinie. Hierfür gibt es kein festes Maß, da es u.a. von den Sichtbedingungen abhängt; als Orientierungswert können ca. 50 m dienen. Ca. 10 m vor dem gemäß RAL (2012) 11,25 m langen Fahrbahnteiler beginnt eine Sperrfläche (vgl. M KV, 2006 bzw. Bild 4.1). Üblicherweise beginnt in diesem Bereich – je nach Form und Breite des Fahrbahnteilers – auch die äußere Fahrbahnrandverziehung. Gemäß den Gestaltungsbeispielen der RAL (2012) beginnt die bauliche Verziehung ca. 35 m vor der Kreisfahrbahn (vgl. Bild 4.2).



(M KV, 2006)

Bild 4.1: Verkehrszeichen und Fahrbahnmarkierungen an Kreisverkehren außerorts



(RAL, 2012)

Bild 4.2: Abstand des Beginns der Fahrbahnrandverziehung von der Kreisfahrbahn



Situation an einem neuen, rechtwinklig angelegten Kreisverkehr („Maiwaldkreuzung“ im Zuge der L 87 bei Achern, Baujahr 2017): Beginn der Verziehung des Fahrbahnrandes ca. 70 m vor der Kreisfahrbahn; eigene Bearbeitung auf Foto-Grundlage des LUBW-Online-Kartendienst (2019)

Bild 4.3: Beispiel für eine sehr weit ausholende Verziehung

In der Praxis finden sich Abstände zum Beginn der Verziehung zwischen 25 und 60 m, tlw. auch darüber (vgl. Bild 4.3).

4.2 Verkehrliche Eingangsgrößen

4.2.1 Auswahl von Kreisverkehren

Das Untersuchungskollektiv bilden Kreisverkehre aus den Zuständigkeitsbereichen der Polizeipräsidien (PP) Karlsruhe und Offenburg (Baden-Württemberg; Zuschnitt der Präsidien jeweils Stand Januar 2017). Sowohl Topografie als auch Siedlungsstruktur und -dichte in diesen Bereichen sind heterogen und werden als geeignet angesehen, die maßgeblichen Verkehrszustände sowohl in ländlichen als auch in urbanen Räumen abzudecken; so sind bspw. Gemeinden aller Raumkategorien gemäß dem Landesentwicklungsplan (LEP) Baden-Württemberg (MWA BW, 2002) vertreten, welche die Siedlungs- und damit auch die Verkehrsstrukturen des untersuchten Gebietes abbilden (vgl. Bild 14.2 in Anlage 14.2).

Aus der Gesamtheit aller Kreisverkehre werden nur einstreifig befahrbare Außerorts-Kreisverkehre bzw. diejenigen Kreisverkehre in Übergangsbereichen bzw. an nicht angebauten Straßen innerhalb von offeneren Ortslagen ausgewählt, die mindestens eine Zufahrt mit deutlichem Außerortscharakter und allgemein Entwurfs- und Betriebsmerkmale von Außerortsanlagen aufweisen sowie keine baulichen Sonderlösungen darstellen. Im Kollektiv sind einige Kreisverkehre mit einem Bypass aufgenommen, da der Entwurf des eigentlichen Kreisverkehrs dadurch nicht beeinflusst ist. Weiterhin sind die beiden Kreisverkehre der Autobahnanchlussstelle Kronau an der BAB A5 Teil des Kollektivs, auch wenn beide mit einem Innenring ausgeführt sind – einmal baulich in Pflasterbauweise (Ost) und einmal abmarkiert (West). Dies geschieht zum einen aufgrund ihrer eindeutigen Außerortslage und zum anderen, da erhofft wird, mithilfe dieser Kreisverkehre mit ihren relativ seltenen, großen Außendurchmessern (46 bzw. 50 m) belastbarere Aussagen zu größeren Anlagen insgesamt zu erhalten (vgl. auch Bild 14.3 in Anlage 14.2). Zudem weisen diese beiden Kreisverkehre eine hohe Verkehrsstärke

(DTV) auf, die das Kollektiv in diesem Sinne vervollständigen. Einzelheiten zur Ermittlung der Verkehrsbelastung an den jeweiligen Kreisverkehren können Anlage 14.3 entnommen werden.

4.2.2 Unfalldaten – Zuordnung und Bildung von Kollektiven

Die Unfälle entstammen dem Fünfjahreszeitraum 2012 bis 2016, alle Datensätze beinhalten Unfalltexte und/oder -diagramme. Das Grundkollektiv (Kollektiv 1.1) bilden 137 Anlagen mit 531 einzelnen Zufahrten und insgesamt 817 Unfällen aller Typen, die dem Kreisverkehr mittelbar zugeordnet werden können (z.B. Entfernung der Unfälle auf umlaufenden Radwegen). Für vertiefte Untersuchungen an bestimmten Teilen des Datensatzes erwies sich die Unterteilung in weitere Teilkollektive als sinnvoll (vgl. Tabelle 4.1).

| Bezeichnung | Beschreibung | Anzahl der Kreisverkehre | Anzahl der Zufahrten | Anzahl der Unfälle |
|---------------|---|--------------------------|----------------------|--------------------|
| Kollektiv 1.1 | Alle Außerorts-Kreisverkehre ohne Sonderlösungen mit allen Unfällen | 137 | 531 | 817 |
| Kollektiv 1.2 | Unterschied zu Kollektiv 1.1: Auswahl derjenigen Unfälle, die Zu- und Einfahrten zugeordnet werden konnten (Unfalltypen 1, 3 und 6) | 137 | 531 | 626 |
| Kollektiv 1.3 | Unterschied zu Kollektiv 1.2: Auswahl der Kreisverkehre, für die ein vollständiger DTV vorliegt (vgl. Anlage 14.3) | 50 | 187 | 270 |
| Kollektiv 1.4 | Fünf Kreisverkehre, an denen die Fahrlinienuntersuchung durchgeführt wird (vgl. Kapitel 5) | 5 | 18 | 57 |

Tabelle 4.1: Übersicht über die in dieser Arbeit verwendeten Kreisverkehrskollektive

Um eine zufahrtsgenaue Betrachtung durchführen zu können, werden die Unfälle über die polizeilichen Unfalltexte bzw. -diagramme den einzelnen Zufahrten der Kreisverkehre zugeordnet. In diesem Zuge werden alle Unfälle aussortiert, die nicht einer Zufahrtssituation zugeordnet werden konnten (z.B. Unfälle bei der Ausfahrt, Unfälle infolge eines Sturzes oder durch Ladungsverlust auf der Kreisfahrbahn, etc.). Es verbleiben als Kollektiv 1.2 ausschließlich Unfälle der Typen Fahrnfall, EK-Unfall sowie Unfall im Längsverkehr.

4.2.3 Bestimmung geeigneter Unfallkostensätze

Bei der Betrachtung von Unfallkostensätzen ist grundlegend zu beachten, dass im Kollektiv ausschließlich Knotenpunktunfälle enthalten sind, sogar mit der weiteren Einschränkung, dass es sich speziell nur um Kreisverkehrsunfälle handelt. Wie im Rahmen der Unfallanalyse (Kapitel 2.3) herausgearbeitet wurde, weisen Kreisverkehrsunfälle im Unterschied zu allgemeinen Unfallkollektiven an Straßen bzw. Knotenpunkten folgende Merkmale auf:

- Unfälle an Kreisverkehren haben einen geringeren Anteil von Unfällen mit schwerem Personenschaden als die übrigen Knotenpunktunfälle
- Für die überwiegend auftretenden EK-Unfälle werden geringere Unfallschweren infolge geringerer Geschwindigkeiten erwartet, da insbesondere die bevorrechtigten Fahrzeuge auf der Kreisfahrbahn langsamer fahren als bevorrechtigte Fahrzeuge z.B. an Kreuzungen oder Einmündungen.

Aus diesen Gründen wird von der Verwendung allgemeiner Unfallkostensätze abgesehen. Als Alternative dazu stehen zwei Möglichkeiten zur Auswahl (H Uks, 2017):

- Unfallkostensätze in Abhängigkeit von Unfalltyp und Unfallart, jeweils für Autobahnen, Außerorts- und Innerortsstraßen. Allerdings werden dabei die Unfallkostensätze für Unfälle mit leichtem und schwerem Personenschaden zusammengefasst. Im H Uks (2017) werden nur die Unfalltypen 2 und 3 als Knotenpunktunfälle bezeichnet, da Fahrnfälle eigentlich nicht knotenpunkttypisch sind. An Kreisverkehren treten jedoch charakteristisch Fahrnfälle z.B. mit der Kreisinsel auf. Daher sind auch die Unfallarten der Fahrnfälle anders als Durchschnittkollektive zusammengesetzt; weiterhin sind z.B. so gut wie keine Unfälle mit Entgegenkommenden zu erwarten⁵. Zudem treten klassische „Kreuzen“-Unfälle von zwei Fahrzeugen, die beide mit hoher Geschwindigkeit fahren und daher typischerweise schwere Unfallfolgen nach sich ziehen, an Kreisverkehren nicht auf.
- Berechnung von angepassten Unfallkostensätzen anhand der vorliegenden Kollektivzusammensetzung.

Hieraus lässt sich ableiten, dass Unfälle an Kreisverkehren spezifische Besonderheiten aufweisen, wodurch einer Verwendung von auf das Kollektiv angepassten Unfallkostensätzen vor netzweit standardisierten Unfallkostensätzen der Vorzug zu geben ist. Diese besonderen Ausprägungen schlagen sich auch in den Unfalltypen und Unfallarten nieder, wodurch die Herangehensweise mit Unfallkostensätzen in Abhängigkeit von Unfalltyp und Unfallart des H Uks (2017) im vorliegenden Fall untauglich ist; hingegen erscheint die Variante mit angepassten Unfallkostensätzen geeignet.

Auf Grundlage der vorhandenen Unfälle werden daher angepasste Unfallkostensätze aKS entsprechend der „liberalen Variante“ für kleine Kollektive gemäß H Uks (2017) ermittelt (vgl. Tabelle 4.2) und in der Untersuchung verwendet (Berechnung und kritische Betrachtung vgl. Anlage 14.4).

⁵ Als Vorgriff sei angemerkt: Fahrnfälle an Kreisverkehren setzen sich überwiegend aus den Unfallarten 7, 8 und 9 zusammen, die an anderen Knotenpunkten nur selten auftreten und z.B. eher an Kurven zu finden sind (Unfallarten 8 und 9; „Abkommen nach rechts bzw. links von der Fahrbahn“) oder sogar im H Uks nur als „sonstige“ vermerkt werden (Unfallart 7, „Aufprall auf Hindernis“); vgl. auch Bild 4.17.

| | aKS _{U(SP)} (für Unfälle der Kat. 1 bzw. 2) | aKS _{U(LV)} (für Unfälle der Kat. 3) | KS _{U(SS)} (für Unfälle der Kat. 4 bzw. 6) | KS _{U(LS)} (für Unfälle der Kat. 5) |
|---|--|---|---|--|
| Angepasste Unfallkostensätze aKS bzw. Kostensätze für Sachschadensun- fälle mit Preisstand 2005 gemäß BAUM ET AL. (2010); Werte gerundet [EUR] | 210.724 | 17.353 | 17.884 | 5.278 |

Tabelle 4.2: Im Rahmen dieser Arbeit verwendete Unfallkostensätze

4.3 Entwurfsgeometrische Eingangsgrößen

4.3.1 Allgemeines

Im Rahmen dieser Untersuchung sind diejenigen Größen von grundlegendem Interesse, die einen maßgeblichen Einfluss auf das Fahrverhalten ausüben: Je nach Anlage verläuft die Zufahrt in einer jeweils anderen Ausrichtung in Bezug zu Kreisfahrbahn, Kreisinsel und Straßenachse, wodurch sich eine sehr große Zahl an möglichen Fahrlinien ergibt. Diese Fahrlinien können somit in ihren extremen Ausprägungen sehr radial oder tangential auf die Kreisfahrbahn zulaufen. Überdies ergeben sich eine Reihe von Misch- oder Zwischenformen. Daraus resultiert für jede Zufahrt ein individueller Lenkaufwand mit unterschiedlichen räumlichen Bezugspunkten und damit einhergehenden individuellen Verzögerungen, Beharrungen oder Beschleunigungen im Fahrtverlauf eines Fahrzeugs. Um den Einfluss einzelner Entwurfsgrößen bestimmen zu können, werden die untersuchten Kreisverkehre zum Abmessen der Eingangsgrößen nachtrassiert. Grundlage zur Nachtrassierung bildet i.d.R. ein digitales Luftbild der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) im Maßstab 1:500; in einigen wenigen Fällen im Landkreis Karlsruhe konnte auch auf Entwurfsunterlagen zurückgegriffen werden.

4.3.2 Diskussion der verwendeten entwurfsgeometrischen Eingangsgrößen

Außendurchmesser und Breite der Kreisfahrbahn

Der Außendurchmesser D und die Breite der Kreisfahrbahn B_K sind für alle Arme des Kreisverkehrs identisch. Schon solche grundlegenden Maße können das Fahrverhalten entscheidend beeinflussen, denn die – mit dem Außendurchmesser i.d.R. mitwachsende – Größe der Kreisinsel wirkt sich z.B. auf die maximal mögliche Ablenkung bei der Kreisdurchfahrt aus. Die geschwindigkeitsmindernde Wirkung der Ablenkung wird dabei allerdings relativiert durch die bei größeren Kreisverkehren auch insgesamt größeren fahrbaren Radien. Um die Befahrbarkeit der Anlage (Schleppkurven!) sicher zu stellen, muss die Breite der Kreisfahrbahn bei kleineren Außendurchmessern etwas breiter sein (vgl. Kapitel 2.1.2). Bei Einhaltung der Werte aus den Regelwerken und zumindest annähernd auf den Mittelpunkt ausgerichteten Zufahrten mit entsprechender Ablenkung müsste eine Befahrung für alle Bemessungsfahrzeuge möglich sein. Bild 4.4 zeigt auf, dass im Kollektiv 1.2 einige größere Anlagen enthalten sind, die im

Vergleich zu den Regelwerksvorgaben tlw. deutlich größere Kreisfahrbahnbreiten aufweisen; auch in der Literatur konnte dies entsprechend beobachtet werden (vgl. SPAHN UND BÄUMLER, 2007).

Bei der Zufahrt „orientiert“ sich ein Fahrzeug zunächst am rechten Fahrstreifenrand, anschließend bei der Fahrt auf der Kreisfahrbahn am linken Rand entlang der Kreisinsel. Bei gleichem Außendurchmesser bietet eine breitere Kreisfahrbahn (die automatisch eine geringere Ablenkung nach sich zieht) für sinngemäß geradeaus fahrende Fahrzeuge die Möglichkeit einer gestreckteren, krümmungsminimierenden „Ideallinie“ für die Kreisdurchfahrt. Die Breite der Kreisfahrbahn ist als grundlegender Entwurfparameter vorgegeben und in keinem Entwurfsregelwerk als Prüf- oder Justiergröße vorgesehen (vgl. Kapitel 2).

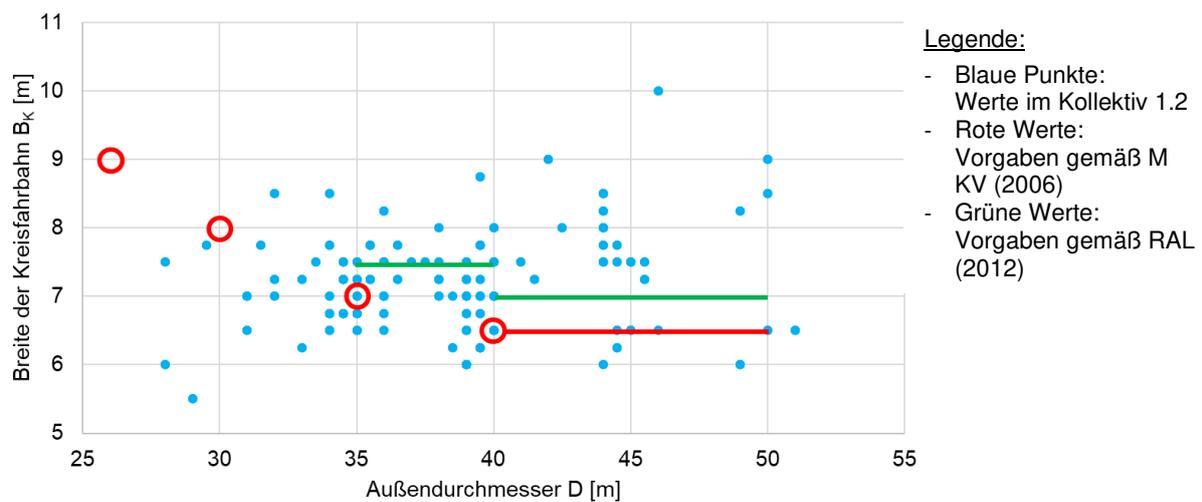


Bild 4.4: Verhältnisse Außendurchmesser D und Breite der Kreisfahrbahn B_K

Eckausrundungsradius und Fahrstreifenbreite der Kreiszufahrt

Am Ende der Zufahrt zur Kreisfahrbahn hin beeinflussen der Eckausrundungsradius der Kreiszufahrt R_Z und die Fahrstreifenbreite der Kreiszufahrt B_Z das Fahrverhalten: Größere – und auch längere! – Eckausrundungen wirken der baulichen Ablenkung durch die Mittelinsel entgegen, indem sie die Zufahrt zur Kreisfahrbahn hin aufweiten und somit für Geradeausfahrer die möglichen Einfahrradien vergrößern. Dies wirkt auch der Ablenkung entgegen, da diese durch die Fahrstreifenbreite (vor Einsetzen der Eckausrundung) bestimmt wird. Außerdem finden sich unabhängig von den Eckausrundungen sehr häufig deutlich breitere Zufahrten als im Merkblatt vorgesehen (vgl. Bild 4.5), die tlw. über die Länge auch aufgeweitet sind.

Sehr kleine Eckausrundungen finden sich sowohl bei überbreiten Fahrbahnen, bei der größere Ausrundungen fahrgeometrisch nicht erforderlich sind, als auch bei sehr schmalen und daher tendenziell untergeordneten Zufahrten – möglicherweise ist dort kein Schwerlastverkehr o.ä. zu erwarten.

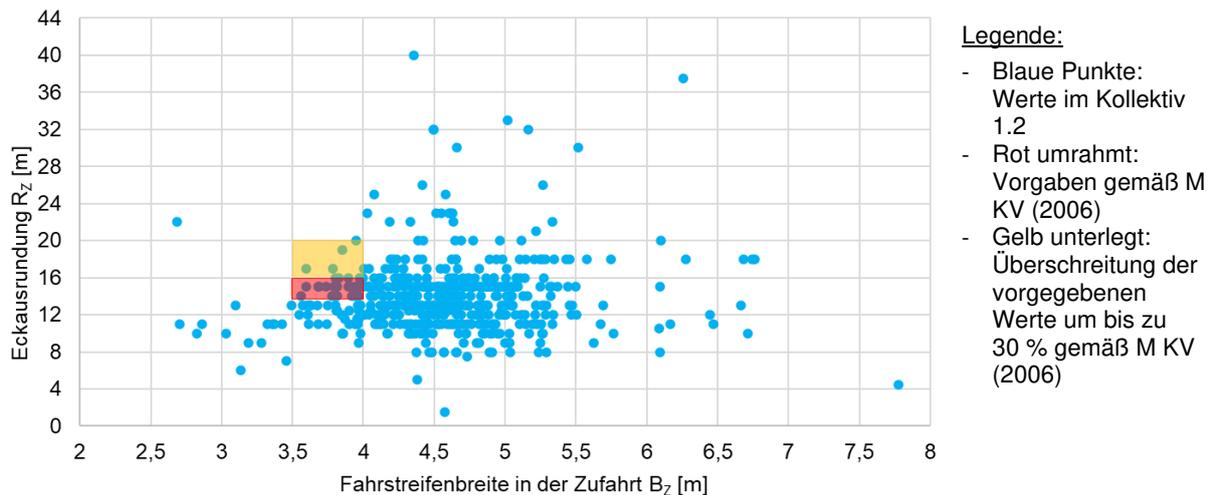


Bild 4.5: Verhältnisse Fahrstreifenbreite in der Zufahrt B_z und Eckausrundung R_z

Außendurchmesser im Verhältnis zum DTV

Zwar hat das Verhältnismaß des Außendurchmessers zur Verkehrsmenge (DTV) keinen direkten Einfluss auf das Fahrverhalten eines einzelnen Fahrzeugs, jedoch hängt das Fahrverhalten auch von der Verkehrsbelastung ab: Von anderen Verkehrsteilnehmern unbeeinflusste, „frei fahrende“ Fahrzeuge verhalten sich anders als „Hinterherfahrer“. Müssen Fahrzeuge an der Kreiseinfahrt verkehrsbedingt anhalten, sind die Durchfahrbedingungen andere als die von „frei fahrenden“ Fahrzeugen, was sich vermutlich auf das Geschwindigkeitsniveau auswirken dürfte. Die in Bild 4.6 dargestellte Übersicht lässt erkennen, dass in der Praxis der empfohlene verkehrliche Einsatzbereich für Kreisverkehre weitestgehend eingehalten wird. Werden Kreisverkehre an verkehrlich untergeordneten Knotenpunkten mit geringeren Gesamtverkehrsstärken eingesetzt, werden dafür in der Entwurfspraxis erkennbar kleinere Anlagen verwendet (Außendurchmesser 40 m oder weniger).

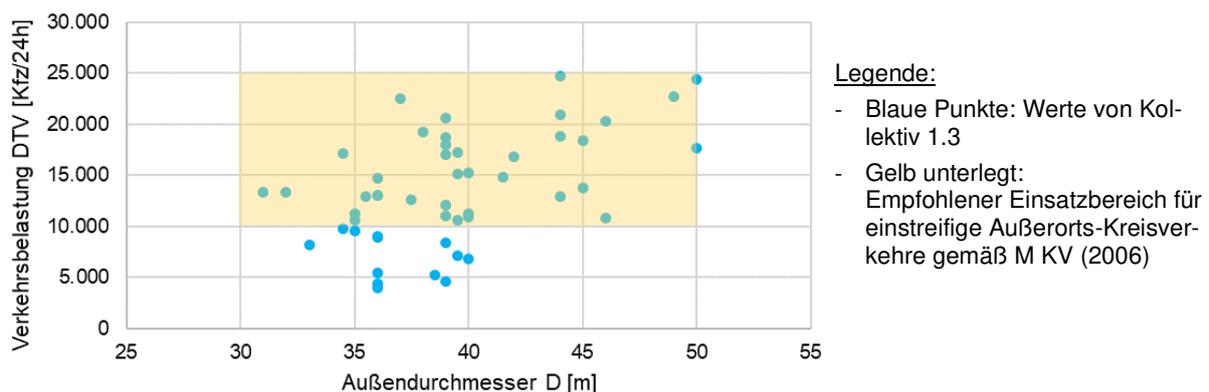


Bild 4.6: Verhältnisse Verkehrsstärke DTV zum Außendurchmesser D

Breite des Fahrbahnteilers

Fahrzeuge, die die krümmungsminimierte „Ideallinie“ fahren möchten, orientieren sich im Bereich der Einfahrt am äußeren, rechten Fahrbahnrand und fahren eher tangential auf die Kreisfahrbahn ein. Eine Orientierung kann aber auch der linke Fahrbahnrand der Zufahrt bieten (der

i.d.R. vom Fahrbahnteiler gebildet bzw. geformt wird). Der Einfluss des linken Randes ist umso höher anzusetzen, je mehr der Fahrbahnteiler zur Kreisfahrbahn hin aufgeweitet (deutlich über die empfohlenen 2,5 m, vgl. Kapitel 2.1.2) und insgesamt eher dreiecksförmig ist. In solchen Fällen ist davon auszugehen, dass die Fahrzeuge von der Straßenachse mehr und mehr „abgedrängt“ werden, was dann zwangsläufig zu einer eher tangentialen Einfahrt in die Kreisfahrbahn führt. Im vorliegenden Kollektiv wird die empfohlene Breite gemäß RAL (2012) teilweise deutlich überschritten (vgl. Bild 4.7).

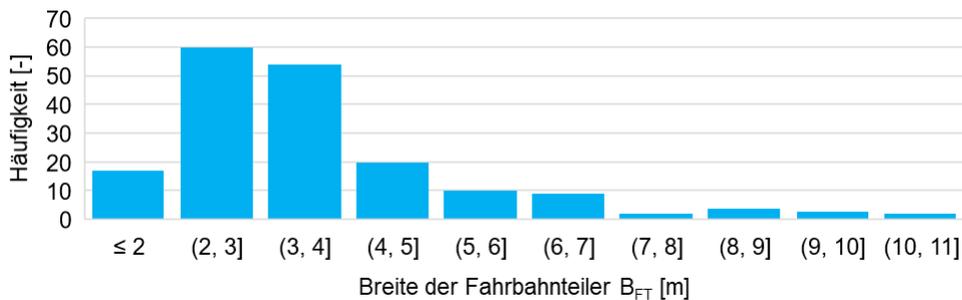
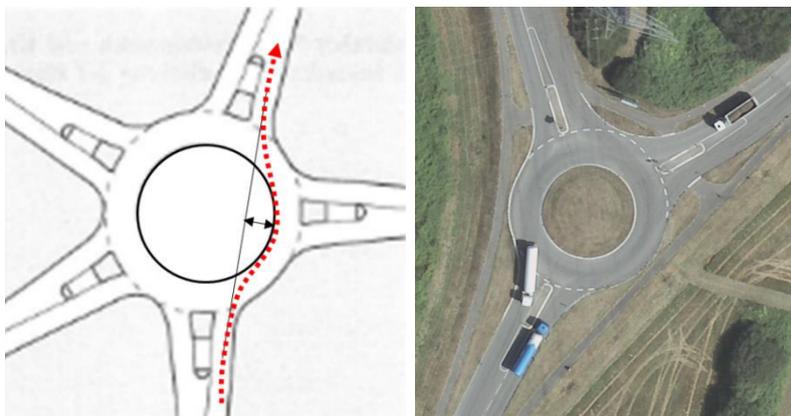


Bild 4.7: Verteilung der Fahrbahnteilerbreite im Kollektiv 1.3

Winkel zum Arm links

Zum Winkel der Arme untereinander geben die gültigen Regelwerke keine feste Größe vor; die mehrfach erwähnte „rechtwinkelige Zuführung der Arme“ ist unabhängig davon. Das Merkblatt M KV (2006) der FGSV macht allerdings auf die Problematik bei „nicht senkrecht zueinander einmündenden Knotenpunktarmen“ in Bezug zu einer ausreichenden Ablenkung aufmerksam. Auch Kreisverkehre mit drei Armen und „etwa gleichen Winkeln zwischen den zuführenden Straßen“ werden in diesem Zusammenhang erwähnt (ebd.).

Die dort abgebildeten Systemskizzen und Fotos zeigen überwiegend rechtwinklige Anlagen; beim beispielhaft in Bild 4.8 abgebildeten fünfarmigen Kreisverkehr wird die angesprochene Problematik aber recht deutlich. Die kritischen Winkel zwischen zwei Armen liegen anschaulich im Bereich von 133 bis 167 gon, die im Kollektiv 1.3 nur in geringer Anzahl auftreten (vgl. Bild 4.9). Vorzuziehen sind bei vierarmigen Kreisverkehren Winkel von etwa 100 gon (bei 90 bis 110 gon liegt auch erkennbar der Schwerpunkt der betrachteten Arme im Kollektiv 1.3).



Links:

Fünfarmiger Kreisverkehr mit erkennbar zu geringer Ablenkung (Eigene Bearbeitung (2021) auf Basis von M KV (2006))

Rechts:

Dreiarmiger Kreisverkehr Karlsruhe-Rheinhafen mit ähnlicher Problematik (Luftbild aus LUBW-Online-Kartendienst (2019))

Bild 4.8: Beispiele für Winkel zum „Arm links“ bzw. für die Ablenkung bei drei- bzw. fünfarmigen Kreisverkehren

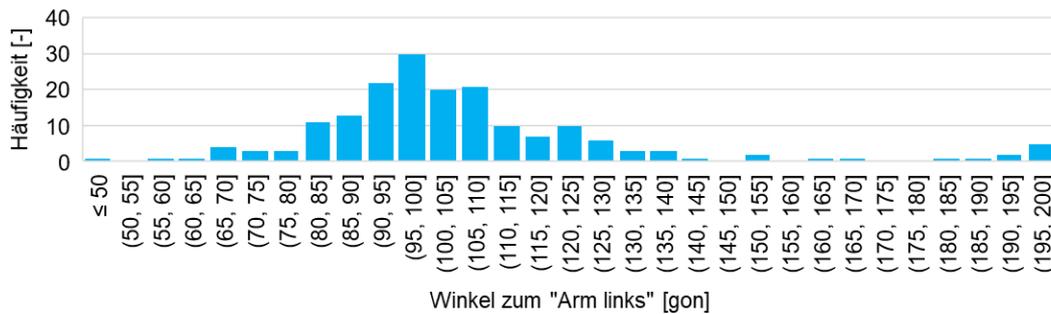


Bild 4.9: Verteilung der Winkel zwischen den Kreisverkehrsarmen im Kollektiv 1.3

Das Merkblatt nennt als Folge bei Nichteinhaltung, dass die Durchfahrt „mit gleichbleibend hoher Geschwindigkeit bei gleichmäßig gekrümmter Fahrlinie“ möglich ist (M KV, 2006), somit finden sich auch hier Auswirkungen auf das Fahrverhalten.

Ablenkung A und „Ablenkmaß“ A / B_Z

Die Ablenkung der Fahrlinie vereint die Einflüsse auf das Fahrverhalten vor allem aus dem Verhältnis von Außendurchmesser zu Kreisfahrbahnbreite, der Ausrichtung sowie der Anordnung der Arme. Da das Sicherheitsniveau von Kreisverkehren insbesondere auf Geschwindigkeitsreduzierungen zurückgeführt wird, die hauptsächlich von der Ablenkung der Fahrlinie bewirkt werden, ist diese Eigenschaft besonders hervorzuheben. Allerdings kann nicht nachvollzogen werden, welcher geometrische Einflussparameter das erreichte Ablenkmaß am stärksten bestimmt. Aus Bild 4.10 wird ersichtlich, dass im Kollektiv 1.2 nur etwa zur Hälfte das im deutschen Merkblatt M KV (2006) geforderte Verhältnis von $A / B_Z \geq 2,0$ eingehalten wird (grüne Werte, vgl. Kapitel 2.1.2); teilweise wird diese Forderung auch stark unterschritten. Gleichfalls wird deutlich, dass eine Ablenkung von weniger als 8,0 m fast nie zur Einhaltung des Kriteriums führt, eine Ablenkung von 11,0 m oder mehr dagegen fast immer.

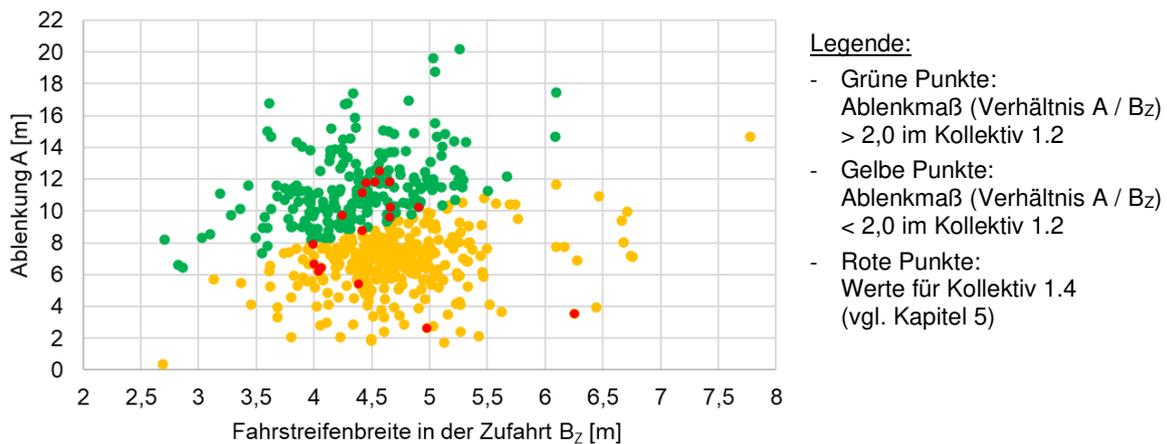


Bild 4.10: Verhältnisse Fahrstreifenbreite B_Z und Ablenkung A

Winkel α_{CH} und β_{CH} (Schweizer Regelwerk)

Als vergleichbares Kriterium zum deutschen Ablenkmaß verwendet das Schweizer Regelwerk den Winkel β , der zur eindeutigen Zuordnung im Folgenden als β_{CH} bezeichnet wird (Konstruktion vgl. Kapitel 2.2.2). Anhand der Trendlinien mit stetig positiver Steigung in Bild 4.11 ist

erkennbar, dass zwischen den Werten des Winkels β_{CH} und dem Ablenkmaß A / B_z ein Zusammenhang besteht, auch wenn er nicht besonders stark ausgeprägt ist. Außerdem wird deutlich, dass für die im schweizerischen Regelwerk als günstig erachtete Größenordnung von $\beta_{CH} > 45$ gon (vgl. Kapitel 2.2.2) das Ablenkmaß sehr stark streut, umgekehrt ist aber bei einem Ablenkmaß $> 2,0$ der Winkel β_{CH} nur in vergleichsweise sehr wenigen Fällen unter 45 gon.

Der zweite Winkel des Schweizer Regelwerks, der Einfahrwinkel α , wird im Folgenden analog als α_{CH} bezeichnet. Durch seine Konstruktion am Fahrbahnteiler liegt er im Einfahrbereich auf der linken Fahrzeugseite. Um in der kritischen Geradeaus-Richtung eine möglichst krümmungsminimierte Durchfahrt zu erreichen, muss sich ein Fahrzeug aber möglichst am rechten Fahrbahnrand orientieren bzw. anschmiegen. Der tatsächliche Einfahrwinkel dürfte daher insbesondere in dieser Fahrrelation von den konstruierten Einfahrwinkeln abweichen, vor allem bei Zufahrten mit großer Fahrstreifenbreite oder großen bzw. langgezogenen Zufahrtsausrundungen R_z . Daher wird auch eine Differenzierung in „radiale“ und „tangentele“ Zufahrten anhand von α_{CH} als nicht zielführend angesehen. Insgesamt ist im Rahmen der nachfolgenden Unfalluntersuchungen ein eher geringer Einfluss von α_{CH} zu erwarten.

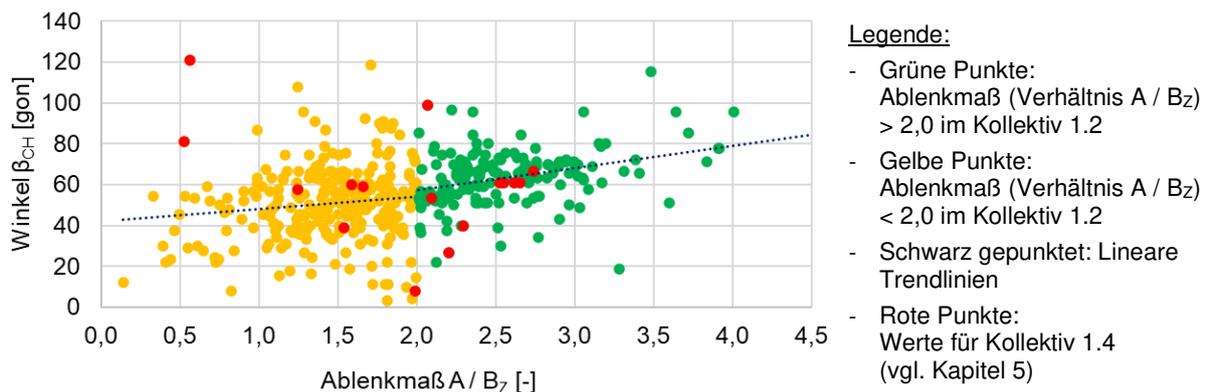


Bild 4.11: Verhältnisse Ablenkmaß A / B_z zu Winkel β_{CH}

Kurvigkeiten der Fahrlinien

Darüber hinaus ist von Interesse, wie zufahrtstypische Eigenschaften wie z.B. der „Grad der Aufweitung des Fahrbahnteilers“ (Führung des einfahrenden Fahrzeugs auf der Fahrerseite), die „Fahrstreifenaufweitung durch die Ausrundung rechts“ (Führung auf der Beifahrerseite) oder „Sichtverhältnisse bzw. Durchschusseffekte“ das Fahrverhalten beeinflussen. Ausschließlich anhand von Lageplanelementen sind diese Effekte nicht sicher ablesbar. Weiterhin erweist sich aufgrund der vorhandenen großen Gestaltungsvarietät der Kreisverkehrszufahrten eine einheitliche Bestimmung abstrakter Größen wie bspw. eines „Grades der Aufweitung“ als sehr schwer durchführbar. Daher wird hier eine „abgeleitete Entwurfseigenschaft“, die ähnlich wie die Ablenkung *die resultierenden Einflüsse mehrerer Entwurfsrandbedingungen in einem Parameter vereint abbildet*, als notwendig und zielführend erachtet.

Als Hilfsgröße sind aus einigen Entwurfsregelwerken Kontrollradien bekannt, die sich teilweise auch auf abstrahierte Fahrlinien bzw. Fahrlinienabschnitte beziehen, aber in den Regelwerken recht schematisch auf ideale Kreisverkehre bezogen werden (vgl. z.B. Bild 2.8). Um auch für unregelmäßige Kreisverkehre eine Abschätzung zu ermöglichen, wie sich die oben aufgeführten Randbedingungen auf die Kurvigkeit der Fahrlinie auswirken, wird für die Geradeaus-Fahrbeziehung in dieser Arbeit eine abstrakte Fahrlinie eingeführt. Mit drei aufeinanderfolgenden Kreisbögen werden die Fahrlinienabschnitte „Einfahrt“ (Rechtsbogen), „Kreisdurchfahrt“ (Linksbogen) und „Kreisausfahrt“ (Rechtsbogen) ohne Übergangsbogen nachgebildet (Einzelheiten zur Konstruktion siehe Anlage 14.1). Als maßgebliche Eigenschaft der abstrakten Fahrlinien wird deren Kurvigkeit KU als Winkeländerung der Fahrlinie über ihre Länge herangezogen. Die allgemeine Berechnung der Kurvigkeit wird in Formel (5) aufgezeigt (RAS-L, 1995).

$$KU = \frac{\sum_{0 \rightarrow i} |\gamma_i|}{L} \quad (5)$$

mit:

- KU = Kurvigkeit [gon/m]
- γ_i = Gesamtrichtungsänderungswinkel der Kurve [gon]
- L = betrachtete Länge [m]

Für die Geradeaus-Richtung wird die Kurvigkeit bezogen auf den 200 gon-Winkel der Achsen der beiden Kreisverkehrsarme als KU_{200} bezeichnet⁶ und in der Einheit gon/10 m angegeben. Mit den abstrakten Fahrlinien in dieser Arbeit soll die „kritischste“ Fahrlinie, mit der der jeweilige Kreisverkehr möglichst geschwindigkeitsoptimiert durchfahren werden kann, nachgebildet werden. Dies wird durch ein möglichst nahes Anschmiegen der Fahrlinien an den jeweils rechten (äußeren) Fahrbahnrand in der Ein- und Ausfahrt bzw. dem linken (inneren) Rand der Kreisinsel umgesetzt.

In Bild 4.12 ist die Kurvigkeit KU_{200} über dem Ablenkmaß aufgetragen. Der Vergleich mit Bild 4.11 zeigt ein ähnliches Verhalten der Werte β_{CH} und KU_{200} und auch hinsichtlich der Lage der Werte für Kollektiv 1.4; dabei ist eine etwas größere Streuung der KU_{200} -Werte zu beobachten. Über einen spezifischen Winkel wie β_{CH} können demnach auch Rückschlüsse auf die Kurvigkeit der Fahrlinie getroffen werden. Zudem ist erkennbar, dass die Verteilung der KU_{200} -Werte zwischen 20 und 30 gon/10m einen Schwerpunkt aufweist und dass für $A / B_z > 2,0$ der KU_{200} -Wert mehrheitlich über 20 gon/10 m liegt; es zeigt sich eine Analogie zu Bild 4.11.

⁶ Zunächst wurde eine analoge Hilfsgröße für die Rechtsabbieger-Richtung als KU_{100} (Konstruktion mit durchgehendem Kreisbogen) erwogen und untersucht. Da sich dieser Ansatz nicht als zielführend herausstellte, wird auf eine Darstellung verzichtet und die Rechtsabbieger-Richtung im Folgenden nicht weiter betrachtet.

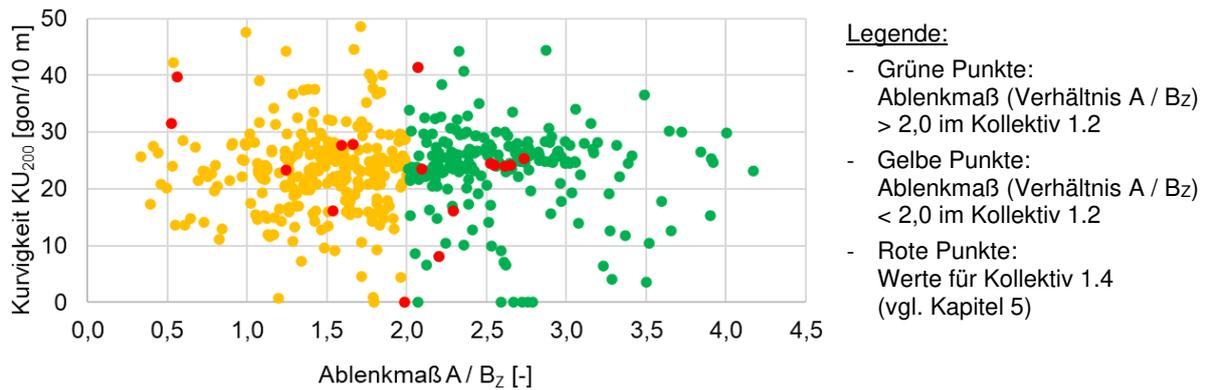


Bild 4.12: Verhältnisse Ablenkmaß A / Bz zur Kurvigkeit KU₂₀₀

Bereits in einigen der früheren Untersuchungen wurde mit konstruierten Fahrlinien und -verläufen gearbeitet; damit wurden bspw. Geschwindigkeitsverläufe auf der Basis von diskreten Messstellen erarbeitet oder Ablenkungen ermittelt und verglichen (RICHTER UND HÜSKEN, 1998). Die Möglichkeiten in der Auswertung sowohl von konstruierten („abstrakten“ oder „ideellen“) als auch von realen, gemessenen Fahrlinien gerade im Vergleich untereinander wurden bislang nicht ausgeschöpft. Die „ideelle Fahrlinie“, die RICHTER UND HÜSKEN bspw. verwenden, verläuft genau in der Fahrstreifenmitte der Zufahrt bzw. der Kreisfahrbahn. Wie allerdings an den Zu- und Ausfahrten die Fahrlinie ausgerundet wird, wird nicht erläutert und erschließt sich auch nicht aus der Abbildung (ebd., S. 29).

Obwohl in BÜHLMANN UND SPACEK (1997) entsprechend der veröffentlichten Messanordnung an drei diskreten Stellen der Kreisfahrbahn jeweils der Randabstand der durchfahrenden Fahrzeuge zum Messpfosten ermittelt wurde, kommt dieses Maß in den anschließenden Hypothesenüberprüfungen nicht zum Einsatz.

Entwurfseigenschaften des links liegenden Armes

EK-Unfälle geschehen immer mit einem zu- bzw. einfahrenden Fahrzeug sowie einem Unfallgegner, der bereits auf der Kreisfahrbahn fährt und i.d.R. an einer anderen Zufahrt in den Kreisverkehr eingefahren ist. Eine mögliche Ursache für einen EK-Unfall kann in einer falsch eingeschätzten Geschwindigkeit des auf der Kreisfahrbahn fahrenden Fahrzeugs durch das einfahrende Fahrzeug liegen – es wird also versucht, eine zu geringe Zeitlücke zu nutzen. WAMBSGANSS untersuchte Zeitlückenverteilungen bei der Einfahrt in Kreisverkehre (2018); hierbei zeigte sich u.a., dass an einem „regelmäßig“ gestalteten Kreisverkehr Zeitlücken naheliegenderweise dann stark mehrheitlich akzeptiert werden, wenn das zufahrende Fahrzeug zum Entscheidungszeitpunkt bei etwa gleichem Abstand schneller fährt als das Fahrzeug auf der Kreisfahrbahn. Bei unregelmäßig gestalteten Kreisverkehren hingegen werden ähnliche Zeitlücken tlw. sogar mehrheitlich abgelehnt. Dafür werden andererseits Zeitlücken genutzt, bei denen zum Ausgangs(zeit)punkt das zufahrende Fahrzeug bis zu 10 km/h langsamer fuhr als das Fahrzeug auf der Kreisfahrbahn. Diese Auswertungen sind deutliche Indizien dafür,

dass eine erfolgreiche Einschätzung von Zeitlücken schwieriger wird, wenn Kreisverkehre „unregelmäßig“ aufgebaut sind, wodurch in den verschiedenen Zufahrten unterschiedliche Geschwindigkeitsniveaus auftreten können (WAMBSGANSS, 2018). Daher werden ausgewählte Entwurfseigenschaften des links liegenden Armes, die möglicherweise mit einem zügigen Durchfahren in Zusammenhang stehen können, mitbetrachtet (denn i.d.R. können nur aus dieser Zufahrt kommende Fahrzeuge in der Geradeaus-Richtung überhaupt ein erhöhtes Geschwindigkeitsniveau entwickeln z.B. infolge einer geringen Ablenkung):

- Ablenkmaß (A / B_z)_{Arm links}
- α_{CH} , Arm links
- β_{CH} , Arm links
- Kurvigkeit in Geradeaus-Richtung am Arm links: KU_{200} , Arm links

4.3.3 Zwischenfazit

Nach der Analyse der Entwurfsgeometrie des Kollektivs 1.2 kann festgehalten werden, dass in der Praxis deutlich öfter zu großzügige als zu kleine Entwurfparameter für Kreisverkehre gewählt werden. Besonders auffällig sind hierbei die Breiten von Kreisfahrbahn und Zufahrt. Durch diese Gestaltungen wird eine zügigere Fahrweise mit krümmungsoptimierter Fahrlinie ermöglicht, die das angestrebte „geringe Geschwindigkeitsniveau“ (M KV, 2006) konterkariert. Darüber hinaus ist es schwierig, die verbreitete Unterteilung von Zufahrten als „radial“ oder „tangential“ anhand einzelner, aus dem Zusammenhang der Gesamtanlage gerissener Entwurfparameter zu vollziehen, auch wenn einzelne Indizien wie z.B. sehr breite Fahrbahnteiler oder sehr großzügige Eckausrundungen deutliche Hinweise auf tangentielle Zufahrten geben. Je stärker solche Entwurfsformen ausgeprägt sind, desto schwieriger wird es, deren Einflüsse durch eine entsprechende Entwurfsanpassung an anderer Stelle aufzuwiegen.

Für eine vergleichende Untersuchung von Geometrie und Unfallgeschehen an den Kreisverkehrsarmen stehen somit Entwurfparameter, Verhältnisgrößen oder abgeleitete Größen zur Verfügung (vgl. Tabelle 14.1 in Anlage 14.2). Hieraus werden im Zuge der folgenden Auswertungen diejenigen Größen identifiziert, die einen möglichst ausgeprägten Einfluss auf das Unfallgeschehen aufweisen. Auf Grundlage der ersten Überlegungen wird ein besonderer Fokus auf diejenigen Entwurfseigenschaften gelegt, bei denen ein direkter Einfluss auf das Fahrverhalten der Fahrzeuge in der Zufahrt bzw. auf der Kreisfahrbahn zu erwarten ist. Es werden, obwohl bereits im Rahmen der vorangegangenen Diskussion einige dieser Einflusstendenzen erkannt wurden, zunächst alle erarbeiteten Entwurfparameter oder Verhältnisgrößen in die Auswertung miteinbezogen. Da eine schrittweise Auswertung vorgesehen ist (vgl. Kapitel 4.6), die nicht von der Art und Anzahl der verwendeten Eingangsgrößen beeinflussbar ist, ist eine umfassende Betrachtung möglich und gleichzeitig sind auch keine Nachteile durch den großen Datenbestand zu erwarten.

4.4 Zufahrtsgenaue Unfalluntersuchung am Kollektiv 1.2

4.4.1 Allgemeines zum Kollektiv 1.2

Kollektiv 1.2 enthält diejenigen Unfälle, die sich im Zufahrts- bzw. Einfahrtsbereich ereigneten. Die Unfälle werden jeweils der Zufahrt des unfallverursachenden bzw. -verschuldenden Beteiligten (in den Unfalldaten: Beteiligte 01) zugeordnet. Bei den Unfällen konnte i.d.R. auch auf die textlichen Unfallberichte zurückgegriffen werden. Es verbleiben insgesamt 626 auswertbare Unfälle der Unfalltypen Fahrnfall, EK-Unfall bzw. Unfall im Längsverkehr an 137 Kreisverkehren mit zusammen 531 Zufahrten. Einen Abgleich des ungefilterten Gesamtunfallgeschehens (Kollektiv 1.1) mit dem hier verwendeten Kollektiv 1.2 zeigt Anlage 14.5.

Tabelle 14.8 in Anlage 14.6 gibt einen Überblick zu den Verteilungen der Unfälle im Kollektiv 1.2; der Einfluss von Unfällen mit dem Unfallmerkmal Alkohol wird in Anlage 14.7 behandelt.

4.4.2 Makroskopischer Überblick über das Unfallgeschehen

Von 531 betrachteten Zufahrten sind 251 unfallfrei, was gut 47 % entspricht. Die Verteilung der Unfälle auf die verschiedenen Unfalltypen deckt sich in etwa mit bisherigen Erkenntnissen aus der Literatur (vgl. Tabelle 2.1 bzw. Bild 4.13), was für ein aussagekräftiges Untersuchungskollektiv spricht.

Insgesamt sind 25 % der Unfälle im Kollektiv Fahrnfälle (vgl. Kapitel 4.4.3 und Bild 4.13). Der Anteil der Unfälle mit schwerem Personenschaden (Kategorien 1 und 2) mit über 8 % der Gesamtunfallzahl ist innerhalb dieses Unfalltyps recht hoch, was sich auch an den relativen Anteilen innerhalb der Kategorien widerspiegelt (vgl. jeweils Bild 4.14). Weiterhin führen etwa 48 % der Unfälle zu schweren Sachschäden. Werden nur diejenigen Zufahrten betrachtet, an denen Fahrnfälle vorliegen, wird eine hohe Konzentration mehrerer Unfälle an wenigen Zufahrten sichtbar, denn an 14 der 97 mit Unfalltyp 1 belasteten Zufahrten (dies entspricht unter 3 % aller 531 Arme) sind ca. 39 % der Fahrnfälle zu verzeichnen! Unfälle des Unfalltyps 6, die immer unter Alkoholeinfluss geschehen, sind zu etwa 80 % Fahrnfälle.

Der Anteil der Einbiegen-Kreuzen-Unfälle am Gesamtunfallgeschehen liegt bei annähernd 64 %. Insgesamt wurden 397 solcher Unfälle an 206 verschiedenen Zufahrten beobachtet. Somit lag an knapp 40 % der Arme mindestens ein solcher Unfall vor. Der Anteil der EK-Unfälle an den Unfällen mit leichtem Sachschaden ist mit 77 % vergleichsweise hoch (vgl. Bild 4.14), umgekehrt sind 62 % aller EK-Unfälle der Unfallkategorie 5 zuzuordnen.

Während Unfallkategorie 1 nicht auftritt, sind nur bei rund 23 % der EK-Unfälle Personenschäden zu verzeichnen (Kategorien 2 und 3). Die Unfälle weisen also oft nur minderschwere Unfallfolgen auf. Auch wenn die Verteilung auf die einzelnen Arme weniger konzentriert ist als

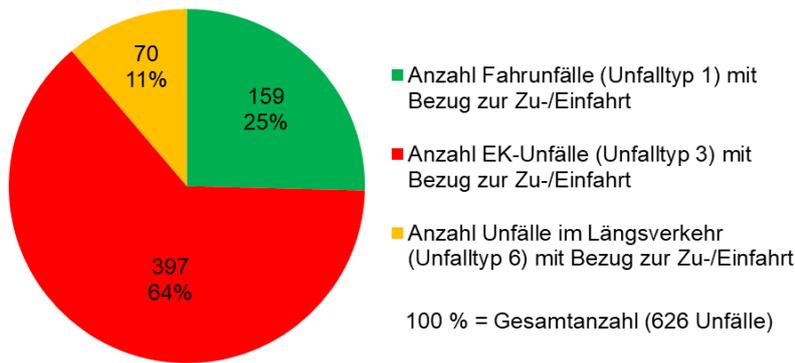


Bild 4.13: Absolute und relative Anteile der Unfälle nach Unfalltypen innerhalb von Kollektiv 1.2

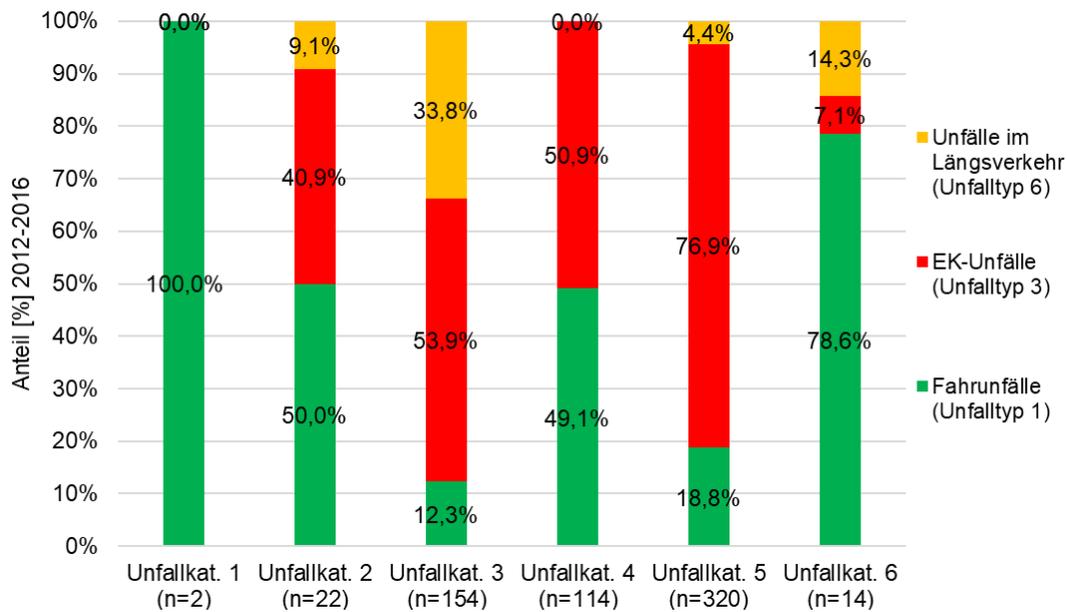


Bild 4.14: Prozentuale Verteilung der Unfälle nach Unfalltyp und Unfallkategorie innerhalb von Kollektiv 1.2

bei Fahrurfällen, so geschehen über 44 % aller EK-Unfälle an weniger als 8 % aller Kreisverkehreinfahrten (40 Örtlichkeiten mit drei oder mehr Ereignissen im Betrachtungszeitraum). Bezieht man den Wert nur auf die mit dem Unfalltyp 3 belasteten Arme, sind knapp 20 % der Arme mit mehr als drei Ereignissen auffällig.

Unfälle vom Typ Längsverkehr stellen mit 70 Ereignissen (gut 11 %) den geringsten Anteil aller betrachteten Unfälle. Diese Unfälle treten an insgesamt 55 Zufahrten (gut 10 % aller Zufahrten) auf, wobei sich an drei Zufahrten kleinere Häufungen zeigen, so dass etwa 16 % der Unfälle dieses Typs an diesen drei Zufahrten zu beobachten sind. Besonders auffällig ist, dass über 75 % der Längsverkehrsunfälle einen Personenschaden zur Folge haben (zumeist leichter Personenschaden).

An 71 Zufahrten konnten Unfälle verschiedener Typen festgestellt werden, davon traten die häufigsten Unfalltypen 1 und 3 an 46 Armen gemeinsam auf (knapp 9 % aller Zufahrten).

4.4.3 Zufahrtsgenaue Unfallkosten

Anhand der Unfallkosten kann die Schwere der Unfallfolgen verglichen werden. Die Unfallkosten sind dabei i.d.R. über den gesamten Betrachtungszeitraum aggregiert (d.h. es sind Datensätze über 5 Jahre enthalten) oder sie sind als Jahreswerte mit einem dem zugrundeliegenden Datensatz entsprechenden Annuitätsteiler verwendet; dieser ist jeweils ausgewiesen. Die Unfallkosten werden für jede Kreisverkehrszufahrt von Kollektiv 1.2 einzeln anhand der jeweils zugeordneten Unfälle ermittelt (zu den Unfallkostensätzen vgl. Kapitel 4.2.3).

- Fahrnfälle weisen durchschnittliche Unfallkosten (UK) von ca. 29.000 EUR je Unfall auf. Alle Fahrnfälle zusammen verursachten im Betrachtungszeitraum Unfallkosten von insgesamt etwa 4,6 Mio. EUR bzw. 920.000 EUR/Jahr bei jährlicher Betrachtung (vgl. hier und im Folgenden jeweils Bild 4.15 und Bild 4.16).
- Die durchschnittlichen UK eines Einbiegen-Kreuzen-Unfalles betragen rund 14.400 EUR. Werden alle UK der EK-Unfälle addiert, so erhält man Gesamtunfallkosten von knapp 5,7 Mio. EUR im Betrachtungszeitraum bzw. 1,14 Mio. EUR/Jahr.
- Die durchschnittlichen UK von Unfällen im Längsverkehr liegen mit etwa 20.500 EUR je Unfall zwischen Fahr- und EK-Unfällen. Die über den Betrachtungszeitpunkt aggregierten Unfallkosten von Unfällen im Längsverkehr erreichen über 1,4 Mio. EUR, dies entspricht fast 288.000 EUR/Jahr.

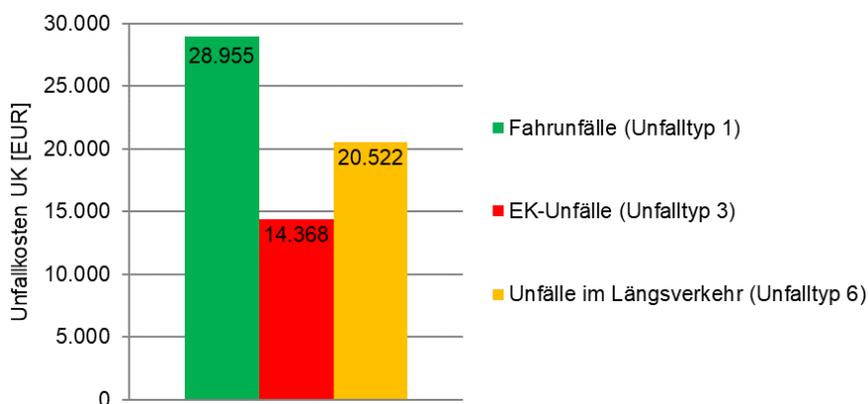


Bild 4.15: Durchschnittliche Unfallkosten eines Unfalls je Unfalltyp in Kollektiv 1.2

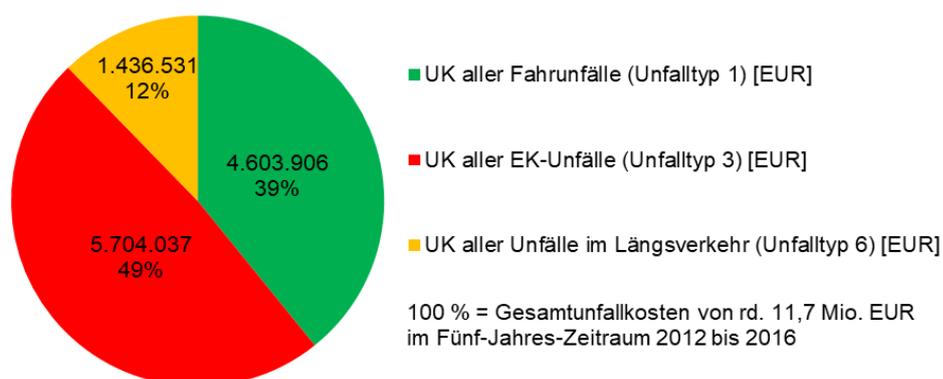


Bild 4.16: Anteile der Unfallkosten (UK) je Unfalltyp an den Gesamtunfallkosten von Kollektiv 1.2

Ein Fahrnunfall zieht statistisch gesehen die schwerwiegendsten Unfallfolgen aller Unfälle an Kreisverkehren nach sich. EK-Unfälle weisen zwar weniger schwere Unfallfolgen auf, sind aber weitaus häufiger anzutreffen. Diese Betrachtungen stimmen mit dem „typischen Unfallbild“ solcher Unfälle überein: Während EK-Unfälle – i.d.R. infolge einer Flankenfahrt von zwei mit eher geringer Geschwindigkeit fahrenden Fahrzeugen – häufig mit niedrigeren Unfallkosten behaftet sind, geschehen Fahrnunfälle mit schwereren Folgen z.B. durch ein Auffahren auf die Kreisinsel mit tlw. unverminderter Geschwindigkeit (vgl. Kapitel 4.4.4). In einigen Fällen wurde auch ein „Überschancen“ der Kreisinsel mit entsprechend hohen Unfallkosten beobachtet. Von den Gesamtunfallkosten von über 11,7 Mio. EUR bzw. durchschnittlich 2,35 Mio. EUR pro Jahr entfallen fast 50 % auf EK-Unfälle und fast 40 % auf Fahrnunfälle (vgl. Bild 4.16).

4.4.4 Mikroskopische Unfalluntersuchungen

Art der Verkehrsbeteiligung

Im Kollektiv 1.2 dominieren eindeutig die Unfälle mit Pkw (im Sinne von Kfz mit zulässigem Gesamtgewicht bis 3,5 t) mit knapp 86 %. Zweiräder verursachen weniger als 2 % der Unfälle im Zusammenhang mit Kreisverkehrszufahrten, Lkw sind in 7,7 % der Fälle unfallverursachend. Die übrigen knapp fünf Prozent sind in den polizeilichen Unfalldatensätzen als sonstige Fahrzeuge klassifiziert; Unfälle mit Bussen, Fahrrädern und Fußgängern wurden keine verzeichnet (bzw. im Vorfeld ausgeklammert, da sie nicht mit der Zufahrtssituation in Verbindung stehen). Das Aufkommen an Unfällen mit Lkw entspricht der erfahrungsgemäß vorhandenen Größenordnung der durchschnittlichen Schwerverkehrsbelastung auf Landstraßen außerorts. Die Lkw-Unfälle sind wiederum zu 85 % EK-Unfälle (entsprechend 10 % aller EK-Unfälle). Dies ist nicht verwunderlich, da insbesondere extreme Geschwindigkeitsüberschreitungen durch Lkw nicht zu erwarten sind (nur einer von vier Fahrnunfällen weist diese Ursache auf). Ein nicht ausreichender Sicherheitsabstand war darüber hinaus ursächlich für zwei der drei Unfälle im Längsverkehr. Unfälle, die von Lkw verursacht werden, ziehen durchschnittliche Unfallkosten von rund 18.550 EUR mit sich, was über den durchschnittlichen UK des dominierenden Unfalltyps Einbiegen-Kreuzen liegt.

Unfallmerkmal Unfallart bei Fahrnunfällen

Bei Fahrnunfällen kann anhand der Unfallart beschrieben werden, ob der unfallverursachende Fahrfehler ein Abkommen von der Fahrbahn oder einen Aufprall auf Hindernisse auf der Fahrbahn zur Folge hatte.

Von Interesse sind insbesondere die Unfallarten 7 („Aufprall auf Fahrbahnhindernis“ – bei Kreisverkehrszufahrten ist dies der Fahrbahnteiler), 8 („Abkommen von der Fahrbahn nach rechts“ – bei Kreisverkehren sinngemäß ein Abkommen nach außen) und 9 („Abkommen von der Fahrbahn nach links“ – bei Kreisverkehren sinngemäß ein Auffahren auf die Kreisinsel).

Es werden dabei nur Kreisverkehrsarme betrachtet, die drei oder mehr Fahrurfälle aufweisen; zusätzlich erfolgt ein Abgleich mit den Unfallhergangstexten bzw. Unfalldiagrammen, um eine weitere Differenzierung innerhalb einer Unfallart zu ermöglichen (vgl. Bild 4.17).

Unfälle mit Abkommen nach rechts (Unfallart 8) treten im Zufahrtsbereich gar nicht auf, sondern nur nachdem die Kreisinsel bereits bis zur Höhe des Folgearmes (sofern vorhanden) passiert wurde. Dies deutet bspw. auf Zufahrten hin, die zügig befahren werden können, für deren zugehörige (gegenüberliegende) Ausfahrt dies jedoch nicht zutrifft. Fahrurfälle, bei denen auf den Fahrbahnteiler (Unfallart 7) aufgefahren wird, treten nur an wenigen Armen gemeinsam mit Unfällen auf, bei denen auf die Kreisinsel (Unfallart 9) aufgefahren wird. Hierauf gründet sich die Vermutung, dass jeweils unterschiedliche geometrische Konstellationen bei Fahrurfällen für ein Auffahren auf den Fahrbahnteiler oder die Kreisinsel ursächlich sein können.

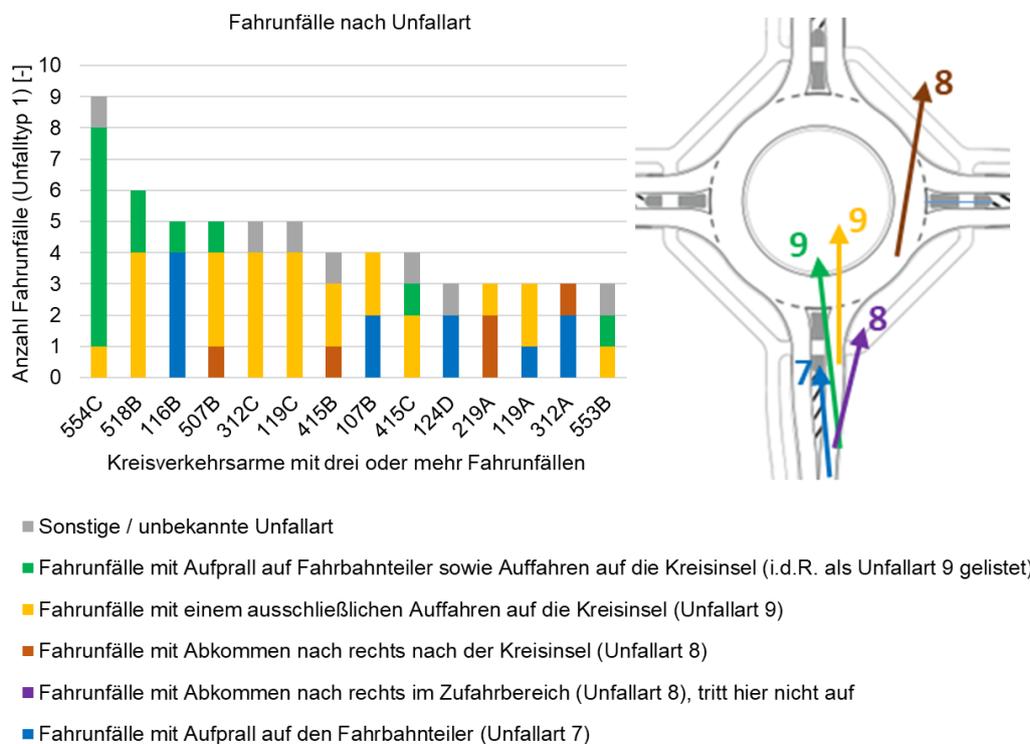


Bild 4.17: Stilisiertes Unfalldiagramm mit drei oder mehr Fahrurfällen inklusive Differenzierung der Unfallart

Unfallmerkmale Lichtverhältnisse und Alkoholeinfluss

Während die deutliche Mehrheit aller EK-Unfälle (gut 65 %) und Längsverkehrsunfälle (70 %) bei Tageslicht geschieht, beträgt der Anteil der Fahrurfälle bei Tageslicht nur knapp 30 %. Der Anteil der Unfälle bei Dämmerung ist bei allen Unfalltypen recht gering (max. 6 %) und daher eher vernachlässigbar. Wird der auffällig hohe Anteil der Fahrurfälle bei Dunkelheit mit dem ausschließlich hier hervortretenden weiteren Unfallmerkmal „Alkoholkonsum“ überlagert, wird deutlich, dass gut 25 % aller Fahrurfälle des Kollektivs beide Merkmale aufweisen! Der Anteil der „Alkohol-Unfälle“ an den Fahrurfällen bei Dunkelheit liegt bei über einem Drittel (40 von 107 Ereignissen, vgl. Bild 4.18).

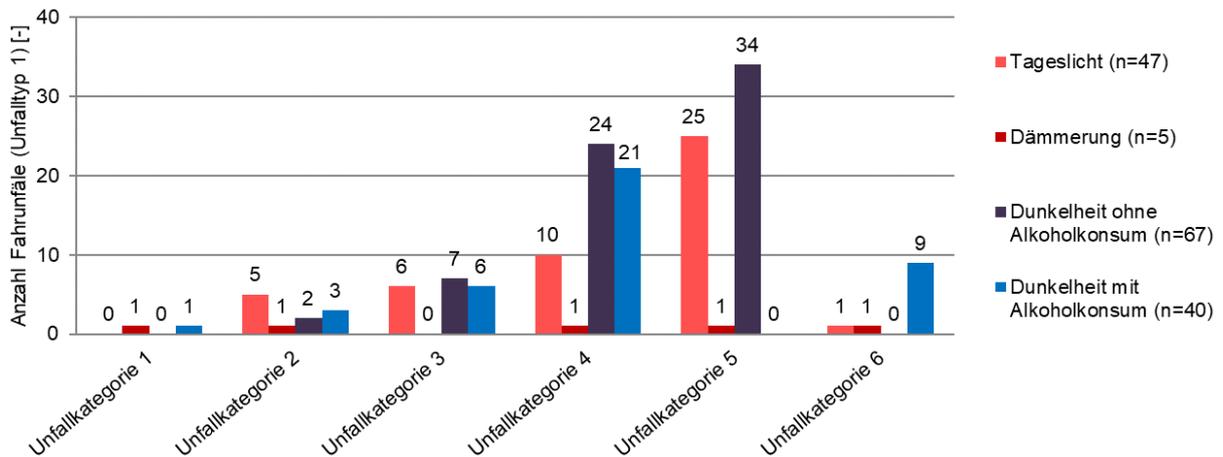


Bild 4.18: Unfallmerkmale "Lichtverhältnisse" und "Alkoholkonsum" bei Fahrurfällen

Besonders hoch ist der Anteil der Unfälle bei Dunkelheit bei Kategorie 4 („Schwerwiegender Unfall mit Sachschaden, Kfz nicht fahrbereit“); er beträgt über 80 % (45 von 55 Unfällen). Von diesen 45 Unfällen weisen 39 (entspricht 87 %) Unfallart 7, 8 oder 9 auf (vgl. Kapitel 4.4.3). Es ist naheliegend, dass ein Kfz nach einem Auffahren auf den Fahrbahnteiler oder die Kreisinsel (höchster Anteil mit über 50 %) durch entsprechende Beschädigungen nicht mehr fahrbereit ist. Der Anteil an Alkoholbeeinflussungen liegt dabei in jeder Unfallart grob bei der Hälfte. In Anlage 14.7 finden sich weitere Untersuchungen zum Unfallmerkmal „Alkoholkonsum“.

Unfallursache überhöhte oder nicht angepasste Geschwindigkeit

In den polizeilichen Unfallprotokollen wird dem Unfallverursachenden bei 103 von 159 Fahrurfällen eine der Ursachen „überhöhte“ bzw. „nicht angepasste Geschwindigkeit“ zugeordnet. Die Auswertung anhand der durchschnittlichen UK je Unfall zeigt, dass Unfälle mit den Ursachen „überhöhte“ bzw. „nicht angepasste Geschwindigkeit“, aber ohne „Alkoholkonsum“, jeweils UK hervorrufen, die um gut ein Viertel über den durchschnittlichen UK dieses Unfalltyps liegen (vgl. Bild 4.19). Fahrurfälle, denen sowohl „überhöhte“ bzw. „nicht angepasste Geschwindigkeit“ als auch „Alkoholkonsum“ zugeordnet wird, haben die vergleichsweise höchsten Unfallkosten (60 % über den durchschnittlichen Unfallkosten für Fahrurfälle).

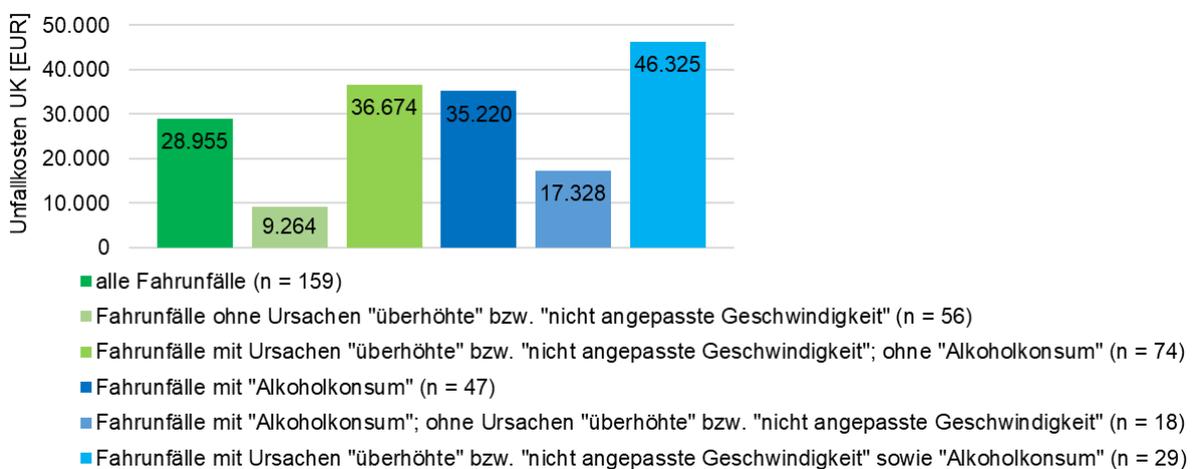


Bild 4.19: Durchschnittliche Unfallkosten von Fahrurfällen in Abhängigkeit von Unfallursachen bzw. -merkmalen

„Alkoholkonsum“ ohne „überhöhte“ bzw. „nicht angepasste Geschwindigkeit“ erweist sich allein stehend betrachtet als deutlich weniger auffällig: Die Unfallkosten liegen hier etwa 40 % unter dem Durchschnittswert für Fahrurfälle. Resümierend zeigt sich, dass eine „überhöhte“ bzw. „nicht angepasste Geschwindigkeit“ deutlich vor Alkoholkonsum als maßgebliche Ursache schwerwiegender Unfallfolgen angesehen werden kann.

Eine Untersuchung der Unfalltypen EK-Unfälle und Unfälle im Längsverkehr hinsichtlich der Merkmale der polizeilichen Unfallprotokolle erweist sich insgesamt leider als wenig ergiebig: Von den 397 EK-Unfällen enthalten lediglich sieben die Unfallursache „nicht angepasste Geschwindigkeit“ beim Unfallverursacher (Unfallbeteiligter 01), weitere zwei Mal findet sie sich beim Unfallbeteiligten 02. Einmal (bei einem Unfall mit Schwerverletzten) findet sich beim Unfallbeteiligten 02 zudem die Unfallursache „überhöhte Geschwindigkeit“.

4.4.5 Zwischenfazit

Als Ergebnis dieser Auswertungen können einige interessante Aspekte festgehalten werden:

- 1) Fahrurfälle haben einen Anteil von etwa einem Viertel am Gesamtunfallgeschehen. Die Unfallkosten je Ereignis sind die relativ höchsten (etwa doppelt so hoch wie bei EK-Unfällen). Die hohe Konzentration vieler Ereignisse auf eine geringe Anzahl an Zufahrten lässt wenige, spezifische Defizite vermuten. Bei Dunkelheit geschehen 67 % aller Fahrurfälle, was einerseits ein Hinweis auf deutliche Defizite bei der Erkennbarkeit allgemein darstellen kann, andererseits aber auch auf Defizite in der Kreisverkehrsanlage.
- 2) Einbiegen-Kreuzen-Unfälle weisen mit ca. 64 % den deutlich größten Anteil am Gesamtunfallgeschehen auf; haben aber tendenziell weniger schwerwiegende Unfallfolgen. Zudem verteilen sich diese Unfälle über mehr Zufahrten als bei den Fahrurfällen. Unter Hinzuziehung der höheren Anzahlen weist dieser Fakt möglicherweise auf mehrere, ungünstige Ausprägungen hin, die solche Unfälle begünstigen können.
- 3) Unfälle im Längsverkehr bilden den dritten, von den Anzahlen her geringsten Anteil von Kreisverkehrsunfällen; dafür haben sie sehr oft Personenschäden zur Folge. Nicht nur aufgrund der geringen Anzahl, sondern möglicherweise auch durch das eher gestreute Auftreten gestaltet sich ein Herausarbeiten von deutlichen Korrelationen vermutlich schwieriger. Obwohl viele Kreisverkehrsarme frei von diesem Unfalltyp sind, erscheint dennoch eine weitere Betrachtung zumindest geboten.

Somit sind einige Hinweise gegeben, die zufahrtsgenaue Untersuchung vertieft fortzusetzen. Von Interesse ist insbesondere, ob von verkehrlichen oder entwurfstechnischen Randbedingungen Rückschlüsse auf die vermuteten Defizite gezogen werden können.

4.5 Zufahrtsgenaue Unfalluntersuchung am Kollektiv 1.3

4.5.1 Allgemeines zum Kollektiv 1.3

Für das Kollektiv 1.3 liegen Daten zur Verkehrsbelastung vor. Somit können hier „Risiko-Betrachtungen“ vorgenommen werden: Die Unfallrate UR bildet das Risiko in Bezug zur Verkehrsbelastung ab, an diesem Knotenpunkt zu verunfallen. Die Unfallkostenrate UKR berücksichtigt darüber hinaus die unterschiedlich schweren Unfallfolgen. Alle Auswertungen werden wieder auf Basis einer Fünfjahres-Betrachtung vorgenommen (2012 bis 2016).

Von den in diesem Kollektiv untersuchten 187 Kreisverkehrsarmen an 50 Kreisverkehren weisen 72 keine Unfälle auf (38,5 %). Durch die ähnliche Verteilung der Unfälle auf die Unfalltypen ist das Kollektiv als repräsentativ für die Gesamtheit (Kollektiv 1.2) anzusehen (vgl. Bild 4.20). Die insgesamt 79 Fahrurfälle treten an 43 Armen auf (dies entspricht 23 % der Arme), EK-Unfälle an 82 Armen (44 %) und Unfälle im Längsverkehr an 16 Armen (14 %). Insgesamt beinhaltet das Kollektiv 1.3 neun Unfälle mit schwerem Personenschaden.

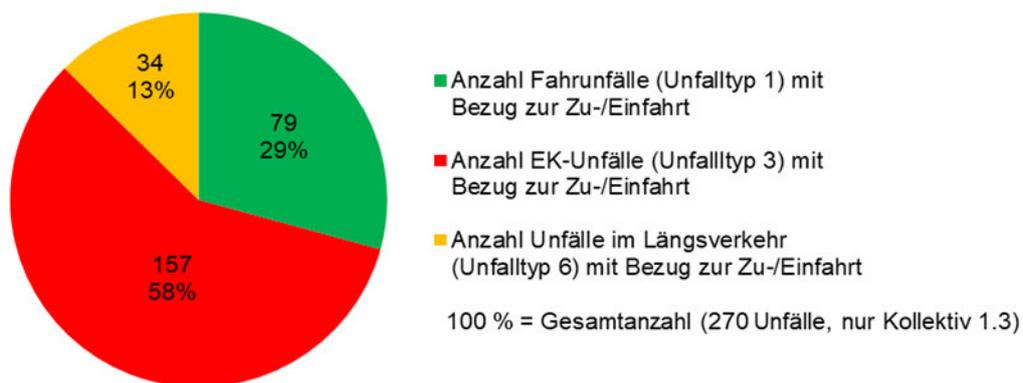


Bild 4.20: Absolute und relative Anteile der Unfälle nach Unfalltypen innerhalb von Kollektiv 1.3

4.5.2 Unfallraten und Unfallkostenraten

Die durchschnittliche UR im Kollektiv 1.3 liegt mit $0,22 \text{ U}/10^6 \text{ Kfz}$ im Rahmen der in der Literaturanalyse ermittelten typischen Unfallraten für neuere Untersuchungen. Die durchschnittliche UKR im Kollektiv 1.3 ist mit $4,38 \text{ EUR}/1.000 \text{ Kfz}$ allerdings nur etwa halb so hoch (vgl. Kapitel 2.3.3 sowie Bild 4.21 und Bild 4.22). Eine Ursache für diese Unterschiede bei den UKR könnten die vergleichsweise wenig schwerwiegenden Unfallfolgen der EK-Unfälle sein. Insgesamt zeigt sich ein recht hohes Sicherheitsniveau von Kreisverkehren, das über die Jahre stetig verbessert wurde.

Auffällig ist in der aggregierten Darstellung in Bild 4.21 und Bild 4.22 das unterschiedliche Niveau von UR bzw. UKR der drei untersuchten Unfalltypen, je nachdem ob als Bezugsgröße die Anzahl aller Kreisverkehrsarme oder nur die Anzahl der Kreisverkehrsarme, die den jeweiligen Unfalltyp aufweisen, herangezogen wird. Das relative Verhältnis der Kennwerte ist dabei jedoch identisch. Außerdem können über den Vergleich von jeweils typspezifischer UR zur

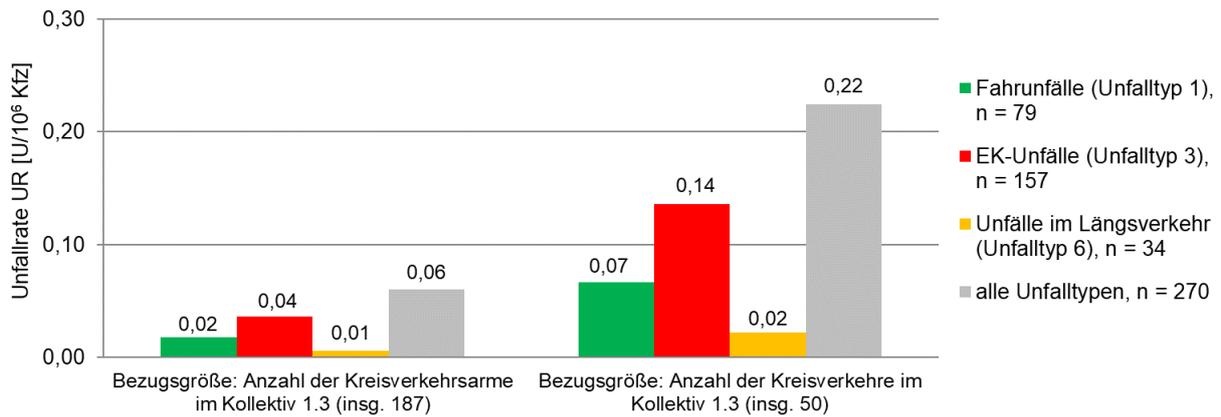


Bild 4.21: Durchschnittliche Unfallrate in Kollektiv 1.3 in Abhängigkeit von verschiedenen Bezugsgrößen

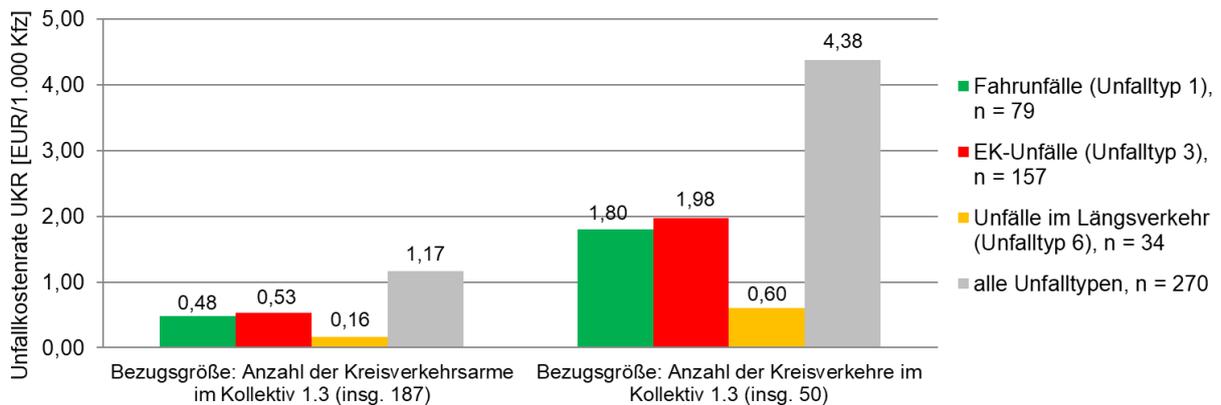


Bild 4.22: Durchschnittliche Unfallkostenrate in Kollektiv 1.3 in Abhängigkeit von verschiedenen Bezugsgrößen

UKR die durchschnittlich schwerwiegenderen Unfallfolgen von Fahrurfällen abgebildet werden.

Die in Kapitel 4.4 herausgearbeiteten Indizien deuten im Zusammenspiel mit diesen Auswertungen darauf hin, dass für jeden Unfalltyp unterschiedliche, spezifische Ursachen an der Kreisverkehrsanlage vorliegen könnten. Daher werden im Folgenden diejenigen ausgewählten Kreisverkehrsarme betrachtet, die – differenziert nach den Unfalltypen 1, 3 und 6 – die jeweils höchsten unfalltypspezifischen Unfallraten aufweisen. Die jeweils 20 höchsten dieser unfalltypspezifischen UR sind in Bild 4.23 bis Bild 4.25 dargestellt. Anhand der dort abgebildeten Verteilungen kann festgestellt werden, dass fast alle Zufahrten nur bezüglich eines Unfalltyps auffällig sind. Lediglich zwei Arme (119C und 312C) weisen höhere Unfallraten sowohl für Unfalltyp 1 als auch 3 auf.

Bei Betrachtung der Unfallkostenraten anstelle der Unfallraten ergibt sich ein insgesamt sehr ähnliches Erscheinungsbild (vgl. Bild 4.26). Auch hier werden die auf das Kollektiv angepassten Unfallkostenraten verwendet. Die drei Zufahrten 119C, 312C und 430C weisen als einzige eine Ausprägung durch zwei Unfalltypen auf. Die zehn Zufahrten mit den höchsten UKR (über 5,00 EUR/1.000 Kfz) beinhalten alle Arme mit Unfällen der Kategorie 2 und zusätzlich die Arme

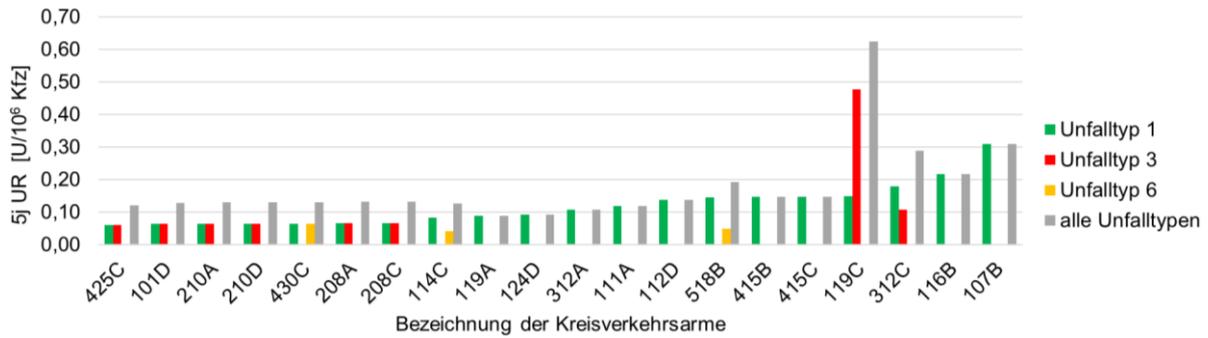


Bild 4.23: Zufahrten mit den 20 höchsten UR nur infolge von Unfällen mit UTyp 1 (alle anderen UR im Vergleich)

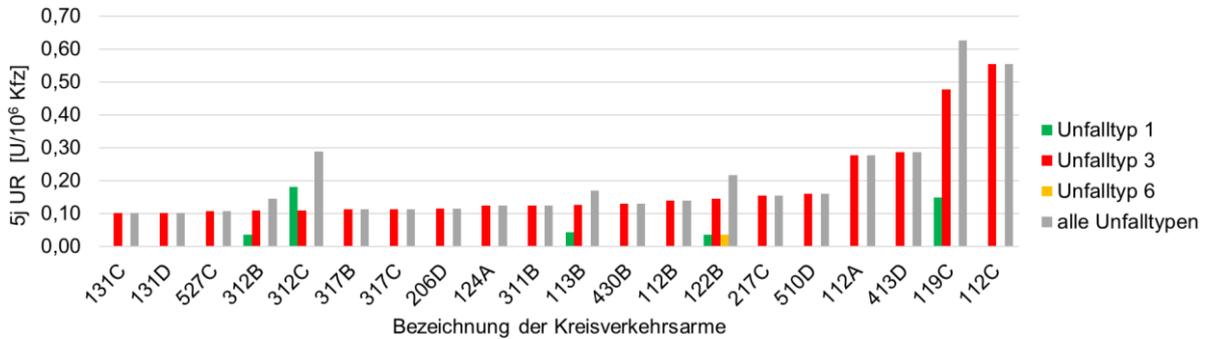


Bild 4.24: Zufahrten mit den 20 höchsten UR nur infolge von Unfällen mit UTyp 3 (alle anderen UR im Vergleich)

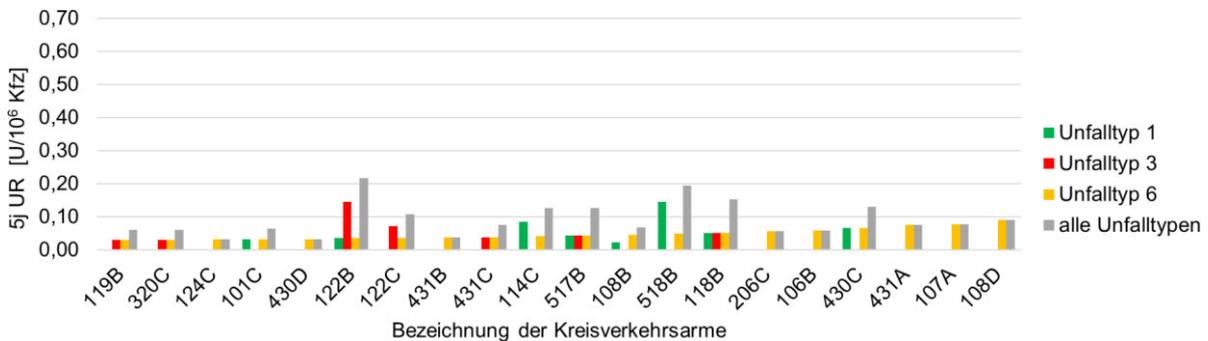


Bild 4.25: Zufahrten mit den 20 höchsten UR nur infolge von Unfällen mit Utyp 6 (alle anderen UR im Vergleich)

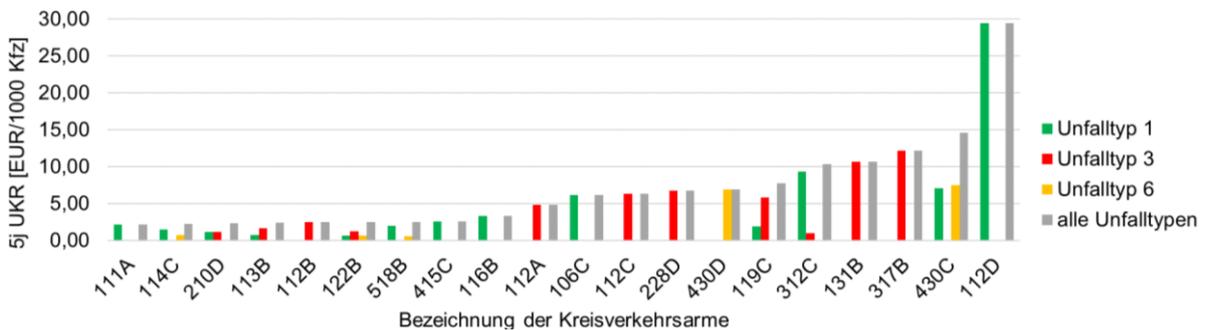


Bild 4.26: Zufahrten mit den 20 höchsten UKR infolge von allen Unfällen überlagert (UKR der einzelnen Unfalltypen jeweils im Vergleich)

112C und 119C mit 4 bzw. 21 Unfällen im Fünfjahres-Betrachtungszeitraum. Dies sind auch die beiden Zufahrten mit den höchsten Unfallraten.

Es wird somit deutlich, dass schon einzelne Unfälle mit hohen Unfallkosten(raten), wohl einerseits durch die Kollektivgröße bedingt, aber andererseits auch durch das insgesamt im

Untersuchungsbereich eher seltene Auftreten, sich in dieser Darstellungs- bzw. Auswertungsform in den Vordergrund drängen und daher mit Vorsicht zu bewerten sind (vgl. Anlage 14.4.2).

4.5.3 Zwischenfazit

Bei beiden Auswertungen fällt auf, dass das Niveau der Unfallraten bzw. Unfallkostenraten an den einzelnen Zufahrten sehr stark durch einen einzelnen Unfalltyp geprägt ist. Dies ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass die den jeweiligen Unfällen zugrundeliegenden Unfallmuster bzw. -hergänge durch unterschiedliche Ursachen begünstigt werden.

Es stellt sich als nächstes die Frage, ob bestimmte Elemente oder Elementgrößen der Entwurfsgeometrie für dieses erkennbar unterschiedliche Unfallgeschehen ursächlich sind.

4.6 Zusammenhänge von Unfallgeschehen und Entwurfsgeometrie

4.6.1 Veranlassung und Datengrundlage

Es wurde dargelegt, dass eine zufahrtsspezifische Betrachtung des Unfallgeschehens an einem Kreisverkehr mit einer Eingrenzung auf diese drei Unfalltypen naheliegend ist: Fahrurfälle, EK-Unfälle sowie Unfälle im Längsverkehr. Während Fahrurfälle, gefolgt von denen im Längsverkehr, die erheblich schwereren Unfallfolgen und somit höheren Unfallkosten hervorrufen, dominieren EK-Unfälle deutlich die Unfallanzahlen: Sie stellen fast zwei Drittel der gesamten zufahrtsbezogenen Unfälle an Kreisverkehren und treten an etwa 40 % der Zufahrten mindestens einmal auf. Das vertiefte Betrachten einzelner Unfallmerkmale zeigt auf, dass das Unfallgeschehen einen Zusammenhang zur jeweils charakteristischen geometrischen Gestaltung jedes Kreisverkehrsarmes aufweisen kann. Daher wird im nächsten Schritt das Unfallgeschehen an Kreisverkehrszufahrten unter Zuhilfenahme von Regressionsmodellen mit der jeweiligen Entwurfsgeometrie bzw. ihren Folgeeigenschaften überlagert. Hierfür werden die Unfall- und Verkehrsdaten von Kollektiv 1.3 verwendet, da durch die ausführlichere Datengrundlage belastbarere Ergebnisse erwartet werden. Zusätzlich werden die Entwurfsgeometrie sowie die Eigenschaften der abstrakten Fahrlinien (KU_{200} -Werte) hinzugezogen.

4.6.2 Vorbedingungen und Modelldesign der statistischen Auswertung

Das Modell wird als zweistufiges Verfahren ausgebildet:

- Stufe 1: Es werden diejenigen Variablen herausgefiltert, denen ein statistisch möglichst deutlicher Einfluss zugeordnet werden kann.
- Stufe 2: Es wird die Art dieses Einflusses an den herausgearbeiteten Variablen untersucht.

In der ersten Stufe werden die Geometriekenngößen als abhängige y-Variablen gewählt, die das Unfallgeschehen erklären sollen; als unabhängige x-Variablen werden die Unfallkenngößen UR bzw. UKR unfalltypspezifisch verwendet. Für jede Geometriekenngöße wird eine

separate Regressionsanalyse durchgeführt. Diesem Vorgehen wird aus verfahrenstechnischen Gründen der Vorzug gegeben: Die Geometriekenngößen sind als unabhängige x-Variablen gerade in der globalen Analyse der Stufe 1 nicht geeignet, da sie teilweise stark korrelierend sind – was in der Natur der Sache liegt, da bspw. Verhältnisgrößen vorliegen oder Werte wie der Außendurchmesser mehrfach (nur an verschiedenen Zufahrten) betrachtet werden. Hingegen korrelieren die Unfallkenngößen nicht bzw. nur schwach. In fast jedem Datensatz der Geometriekenngößen finden sich zudem einige „fehlende Werte“ („Missing Values“, z.B. infolge nicht vorhandener Fahrbahnteiler oder nicht existenter Arme bei dreiarmligen Kreisverkehren („Arm links“ fällt weg)). Da diese „fehlenden Werte“ über den Datensatz verstreut sind, führt eine Auswertung ausschließlich vollständiger Datensätze zu einer deutlichen Reduzierung der verwertbaren Daten. Unfallkenngößen sind in diesem Teilkollektiv lückenlos vorhanden und daher als abhängige Größe in der ersten Stufe gut geeignet.

In der zweiten Stufe wird ein Rollentausch vorgenommen: Die Unfallkenngößen je Unfalltyp werden als abhängige, zu erklärende y-Variablen eingesetzt. Als unabhängige x-Variable wird die auf Basis der Ergebnisse der ersten Regressionsstufe unfalltypspezifisch getroffene Auswahl von Geometriekenngößen verwendet. Aufgrund der bereits erfolgten Spezifizierung wird dieses Vorgehen für Stufe 2 als vertretbar erachtet. Zudem wurde getestet, ob eine „Z-Standardisierung“ der Variablen zu besseren Ergebnissen führt (diese Standardisierung kann erforderlich werden, wenn z.B. Variablen unterschiedlicher Skalierungen vorliegen, vgl. DIAZ-BONE, 2019). Da die Z-Standardisierung keine Verbesserung zeigt, wurde davon abgesehen.

In Bezug auf die internationale Literaturanalyse ist anzumerken, dass dort im Regelfall das Unfallgeschehen (als mehrjähriger Mittelwert über die gesamte Kreisverkehrsanlage) als abhängige Variable verwendet wird (vgl. Kapitel 2.4). Bei einer globalen Betrachtung ist es wahrscheinlich, dass viele Werte von Null verschieden sind, wodurch dieses Vorgehen für die dortigen Untersuchungen geeignet erscheint (es kann also jedem bzw. einer Vielzahl der Anlagenparameter eine Unfallkenngöße ungleich null zugeordnet werden). Das in dieser Arbeit gewählte, zufahrtsgenaue Verfahren weist diesen verfahrenstechnischen Vorteil nicht auf, infolgedessen ein anderer Weg zu beschreiten war.

4.6.3 Regressionsanalyse über einzelne Geometriekenngößen (Stufe 1)

Methode

Aus der Gruppe der verallgemeinerten linearen Regressionsmodelle wird der Ansatz einer Gamma-Verteilung mit logarithmischer Verknüpfungsfunktion gewählt. Dieser Ansatz wird u.a. in der Versicherungswirtschaft verwendet, um Schadensereignisse zu beschreiben (COTTIN UND DÖHLER, 2013). Die unabhängigen x-Werte dieser Datengruppen weisen typischerweise viele Werte zu Null auf, bei denen kein Schaden eingetreten ist, zudem keine negativen Werte,

da keine negativen Schäden eintreten können. Besonders hohe, eher seltene Werte beschreiben selten eingetretene Großschadensereignisse, die besondere Berücksichtigung finden müssen und nicht als Ausreißer im Sinne von Messfehlern schwächer zu bewerten oder gar auszuschließen sind. Durch die Verwendung der Gamma-Verteilung kann i.d.R. überdies der bei derartigen Datensätzen verbreitete und auch hier vorliegende Umstand, dass Heteroskedastizität⁷ vorliegt, zwar nicht vollständig kompensiert werden, jedoch ist die Wahrscheinlichkeit deutlich geringer, dass Heteroskedastizität die Ergebnisse beeinflusst (Hinweis Prof. HELLER, KIT, 2019). Die genannten Kriterien sind gut auf den vorliegenden Unfalldatensatz des Kollektives 1.3 übertragbar, womit der Ansatz einer Gamma-Verteilung geeignet erscheint.

Durchführung und Ergebnis

Für jede Geometriekennggröße wird mit dem Programm SPSS eine separate Regressionsanalyse mit der Gamma-Verteilung mit logarithmischer Verknüpfungsfunktion durchgeführt. In Bild 4.27 sind die einzelnen Signifikanzen aller Regressionsanalysen durch Kennfarben visualisiert: Während die Kennfarbe grün eine (sehr) hohe Signifikanz bzw. Aussagefähigkeit (Signifikanzwert < 0,05), gelb eine mittlere (zwischen 0,05 und 0,10) und orange eine tendenziell bzw. eher geringe Signifikanz (0,10 bis 0,15) bedeutet, stehen Felder mit roter Kennfarbe für eine geringe Signifikanz (Signifikanzwert > 0,15) und dementsprechend für ein nicht belastbares Ergebnis.

| y-Variable | x-Variable | Tests der Modelleffekte | | | | | |
|--|------------|--|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | 5j UR Unfalltyp 1 | 5j UR Unfalltyp 3 | 5j UR Unfalltyp 6 | 5j UKR Unfalltyp 1 | 5j UKR Unfalltyp 3 | 5j UKR Unfalltyp 6 |
| | | Deskriptive Signifikanzwertung Legende: ● (sehr) hoch; ● mittel; ● (eher) gering; ● sehr gering | | | | | |
| D | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| B _K | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| R _Z | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| B _Z | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| D / B _K | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| DTV / D | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| B _{FT} | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Winkel _{Arm links} | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| A | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| A / B _Z | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| (A / B _Z) _{Arm links} | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| α _{CH} | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| α _{CH, Arm links} | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| β _{CH} | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| β _{CH, Arm links} | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| KU ₂₀₀ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| KU _{200, Arm links} | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |

Bild 4.27: Deskriptive Signifikanzwertung der Regressionsanalyse über einzelne Geometriekenngößen (Stufe 1)

⁷ Heteroskedastizität bedeutet, dass eine unterschiedliche Varianz der Residuen vorliegt, was bei einer klassischen linearen Analyse zu einer uneinheitlichen Vorhersageleistung führt (DIAZ-BONE, 2019).

4.6.4 Regressionsanalyse der Unfallkenngrößen (Stufe 2)

Method

In Stufe 2 werden lineare Regressionen mit den Unfallkenngrößen als abhängige, zu erklärende y-Variablen durchgeführt. Es werden nur Datenverknüpfungen mit einer mindestens tendenziellen Relevanz (nicht-rote Kennfarben in Bild 4.27) vorgenommen. Mit diesem Regressions-schritt wird zum einen eine weitere Einschränkung der relevanten Variablenauswahl angestrebt, vor allem aber wird anhand des Vorzeichens des Regressionskoeffizienten untersucht, welche Art von Beeinflussung durch die Entwurfsgrößen auf das Unfallgeschehen vorliegt.

Durchführung und Ergebnis

Die UR und UKR konnten in Stufe 1 jeweils mit mehreren signifikanten Entwurfsgrößen in Verbindung gebracht werden. Mit diesen Entwurfsgrößen wird eine lineare Regression mit einer sogenannten Rückwärtselimination durchgeführt: Dabei wird in mehreren Regressions-schritten jeweils die x-Variable mit der geringsten Signifikanz entfernt, bis nur noch hoch signifikante Variablen ($< 0,05$) in der Formel verbleiben. Die Ergebnisse hierfür sind in den Formeln (6) bis (11) in Tabelle 4.3 dargestellt. Hierzu ist anzumerken:

- Bei der UKR von Unfalltyp 1 wird die Rückwärtselimination vor dem letzten Schritt abgebrochen, da ansonsten nur noch eine Konstante verbliebe (mit korrigierten R^2 von null). Daher ist die Aussage der in Tabelle 4.3 aufgenommenen Formel (9) nicht signifikant.
- Bei der UKR von Unfalltyp 3, bei der nur eine Einflussgröße aus Stufe 1 resultiert, ist die Rückwärtselimination identisch mit einer normalen linearen Regression, vgl. Formel (10).

| Abhängige y-Variable | Formel | $\overline{R^2}$ (korr. R^2) | SEE (Standardfehler des Schätzers) | Sig. ANOVA |
|-------------------------------------|---|---------------------------------|------------------------------------|------------|
| 5j UR UTyp1 [U/10 ⁶ Kfz] | = 0,052 – 0,008 * B _K + 0,003 * A (6) | 0,039 (3,9 %) | 0,044 | 0,015 |
| 5j UR UTyp3 [U/10 ⁶ Kfz] | = 0,158 – 0,000048 * KU _{200, Arm links} (7) | 0,105 (10,5 %) | 0,073 | 0,000 |
| 5j UR UTyp6 [U/10 ⁶ Kfz] | = -0,16 + 0,0000258 * (DTV / D) + 0,007 * (A / Bz) _{Arm links} (8) | 0,112 (11,2 %) | 0,017 | 0,000 |
| 5j UKR UTyp1 [EUR/1.000 Kfz] | = 1,21 – 0,02 * (DTV / D) (9) | 0,007 (0,7 %) | 2,38 | 0,135 |
| 5j UKR UTyp3 [EUR/1.000 Kfz] | = -0,562 + 0,72 * R _Z (10) | 0,094 (9,4 %) | 1,41 | 0,000 |
| 5j UKR UTyp6 [EUR/1.000 Kfz] | = -1,178 + 0,185 * B _K (11) | 0,04 (4,0 %) | 0,76 | 0,003 |

Tabelle 4.3: Formeln der Unfallkenngrößen als Ergebnisse der Regressionsanalyse (Stufe 2)

Für alle Formeln in Tabelle 4.3 wurde das korrigierte Bestimmtheitsmaß $\overline{R^2}$ mit angegeben. Allgemein kann zwar das Bestimmtheitsmaß R^2 „als Maß für die Güte der Anpassung [des Modells] an die Daten herangezogen werden“ (FAHRMEIR ET AL., 2009); R^2 zeigt im vorliegenden Fall in Bezug zur Gesamtvarianz den Anteil der zu erklärenden Unfallvariablen an, der durch die unabhängigen Variablen im Modell abgebildet werden kann. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß $\overline{R^2}$ berücksichtigt allerdings zudem die Anzahl der Variablen. Während ein Bestimmtheitsmaß für ein „gutes“, aussagekräftiges Modell z.B. in der Physik weit über 0,5 liegen sollte, sind für Modelle, bei denen Variablendaten ein menschliches Verhalten oder dessen Auswirkungen abbilden (was bspw. im vorliegenden Fall auf Unfälle zutrifft), „geringere R^2 (deutlich kleiner 50 %) zu erwarten“ (vgl. PFLIEGER, 2014).

Für die Unfälle vom Typ 1 ist in Tabelle 4.3 erkennbar, dass die UR steigt, wenn die Kreisfahrbahnbreite schmaler bzw. wenn die Ablenkung größer wird. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß ist mit etwa 4 % zwar ein geringer Wert, aber die Auswertung ist immerhin signifikant (ANOVA-Wert unter 0,05). Für die Unfallkostenrate konnte für Unfalltyp 1 keine sinnvolle Regression ermittelt werden.

Die Unfallrate von Unfalltyp 3 lässt sich mit einer sehr hohen Signifikanz mit der Kurvigkeit des links liegenden Armes erklären: Je höher diese ist, umso niedriger werden die UR vom Typ 3 in diesen Fällen. Die Schwere der Unfallfolgen von Unfalltyp 3 hängt vom Ausradius der Zufahrt ab: Je größer dieser ist, umso höher ist die Unfallkostenrate. Auch diese Auswertung ist hoch signifikant.

Die Auswertungen zum Unfalltyp 6 sind aufgrund der kleinen Stichprobe mit großer Vorsicht zu bewerten, jedoch fällt bei der UR der relativ größte R^2 -Wert auf (über 11 %). Das Modell beinhaltet die Verhältnisgrößen DTV / D und $(A / B_z)_{\text{Arm links}}$: Je höher diese sind, umso höher ist die Unfallrate. Neben den insgesamt doch eher kleinen R^2 -Werten muss dazu noch einschränkend der Standardfehler des Schätzers (SEE, standard error of estimate) mitbetrachtet werden. Der SEE bezieht sich auf die Einheit der abhängigen Variablen und beträgt bei den UR etwa 13 bis 19 % des maximalen Wertes; bei der UKR liegt er mit 8 bis 12 % etwas darunter. Hieraus wird deutlich, dass lineare Zusammenhänge bei den zu untersuchenden Größen nur ansatzweise zugrunde gelegt werden können.

4.6.5 Erkenntnisse aus den unfalldatenbasierten Regressionsanalysen

Aus den Ergebnissen der ersten Stufe der Regressionsanalyse konnten für die einzelnen Unfalltypen i.d.R. unterschiedliche ursächliche Variablen herausgearbeitet werden; zudem scheint es auch einen Unterschied in den Ursachen zu geben, die Unfälle grundsätzlich begünstigen (UR) und den Kriterien, die zur Schwere der Unfallfolgen beitragen (UKR). Während die Ursachen für die UR etwas deutlicher herausgestellt werden konnten, ist bei den UKR die

Ausbeute bezogen auf die Variablenanzahl gering. Einige der im Vorfeld untersuchten Entwurfsgrößen werden grundsätzlich ausgesondert. Ein wichtiges Fazit ist, dass alleine anhand der Daten zu Geometrie und Unfällen keine umfassenden bzw. aussagekräftigen Resultate erzielt werden können. Es ist daher zu überlegen, welche weiteren Informationen hinzugezogen werden können, um belastbarere Aussagen zu erhalten. Ansatzpunkte hierzu ergeben sich aus den bisherigen Untersuchungen:

- Formel (7) hebt für EK-Unfälle die Kurvigkeit des links liegenden Armes hervor. Je geringer die Kurvigkeiten der abstrakten Fahrlinien sind, desto eher sind geschwindigkeitsoptimierte Kreisverkehrsdurchfahrten in Geradeaus-Richtung möglich. Wenn von links kommende Fahrzeuge daher z.B. schneller als üblich fahren können, steigt das Risiko, dass EK-Unfälle auftreten.
- Formel (10) zeigt einen Einfluss der Entwurfsvariable R_z auf. Je größer R_z ausgeführt wird, desto tangentialer kann ein Fahrzeugführer in die Kreisfahrbahn einfahren. Hieraus kann einerseits ein vergleichsweise höheres Geschwindigkeitsniveau resultieren, was im Gefahrenfall „Einbiegen-Kreuzen“ ein sicheres Anhalten vor einem Konfliktfahrzeug erschwert. Zudem kann eine durch den tangentialen Winkel möglicherweise eingeschränkte Sicht auf das Konfliktfahrzeug unfallfördernd wirken.
- Für Fahrurfälle verweist Formel (6) auf das Ablenkmaß A : Je größer das Ablenkmaß wird, umso höher steigt die UR vom Unfalltyp 1. Erklärungen dafür dürften zum einen in übergroßen Ablenkungen zu finden sein, die vom Fahrzeugführer unterschätzt werden, aber auch im Zusammenhang zwischen der Ablenkung A und B_k , der anderen in der zweiten Regressionsstufe separat vorkommenden Entwurfsgröße eines Kreisverkehrs: Bei einer eher geringen Kreisfahrbahnbreite ist insgesamt eine angepasste Fahrweise erforderlich, was nicht mit großen Ablenkungen kombiniert werden sollte.

Aufgrund der vorgenannten Einschränkungen ist die Stufe 2 der Regressionsanalyse mit Vorsicht zu bewerten. Das Ziel, mit Hilfe von Regressionsansätzen Indizien und Ansätze für weiterführende Untersuchungen zu erlangen und das Untersuchungsfeld einzugrenzen, konnte dennoch erreicht und geeignet umgesetzt werden. Weiterhin ist im Vergleich mit der internationalen Literaturanalyse zu erwähnen, dass insbesondere Ergebnisse der detaillierten Untersuchung von AMBROS ET AL. (2016) gestützt werden können, nach der für eine Vielzahl von Parametern keine statistisch belastbaren Abhängigkeiten hergeleitet werden konnten.

In Bezug auf Unfälle im Längsverkehr konnten im Rahmen der Regressionsanalysen keine Erkenntnisse gewonnen werden, die eine belastbare Weiterführung erlauben. Die Ursache wird vorrangig im eher geringen Anteil dieser Unfälle (etwa 10 %), der auf viele Zufahrten verteilt ist, gesehen, was angesichts der in dieser Untersuchung angewandten Methode die Bereitstellung klarer Erkenntnisse eher erschwert. Darüber hinaus lässt dies aber auch die

Schlussfolgerung zu, dass Ursachen für Längsverkehrsunfälle weniger im Zusammenspiel der Entwurfsparameter zu suchen sind, sondern bspw. in der Erkennbarkeit der Anlagen im Vorfeld. Daher werden Längsverkehrsunfälle im Folgenden nicht weiter betrachtet.

4.6.6 Zwischenfazit: Unfallbegünstigende Risiko-Entwurfs-Konstellationen

Die Auswertungen der Regressionsanalysen lassen sich zu Konstellationen zusammenfassen, die tendenziell unfallbegünstigend sind – ein kausaler Zusammenhang wird hierbei vorausgesetzt. Diese Konstellationen bergen demnach ein höheres *Risiko* für das Auftreten eines Unfallereignisses, auch wenn zum derzeitigen Stand der Untersuchung ein Maß für ein derartiges Risiko noch nicht sicher zu bestimmen ist. Jedoch ist es anhand der Ergebnisse der bisherigen Teilschritte nun möglich, diese Indizien zu hypothetischen Erklärungsansätzen zusammenzufassen, die Wege für die weiteren Untersuchungen aufzeigen (vgl. Tabelle 4.4).

| Risiko-Entwurfs-Konstellation (REK) | | Hypothetischer Erklärungsansatz |
|-------------------------------------|--|---|
| REK 1 | (Sehr) geringe Kurvigkeiten der Fahrlinie am links liegenden Arm bewirken höhere Unfallraten von EK-Unfällen. | Geringe Kurvigkeiten ermöglichen eine krümmungsoptimierte Fahrlinie, die höhere Geschwindigkeiten zulässt. Ein potenzielles Konfliktfahrzeug an der folgenden Zufahrt kann hierdurch die Geschwindigkeit des aus seiner Sichtweise von links kommenden Fahrzeugs z.B. falsch einschätzen, was zu einem EK-Unfall führen kann (dessen Unfallschwere aber vergleichsweise niedrig ist). |
| REK 2 | Zufahrten, die insgesamt eher tangential gestaltet sind, bewirken höhere Unfallkostenraten von EK-Unfällen. | Sehr tangentiale Zufahrten begünstigen vergleichsweise hohe Einfahrgeschwindigkeiten, wodurch bei einem EK-Unfall die Unfallfolgen schwerwiegender werden. Gleichzeitig ist die Sicht nach links eher schlecht, wodurch potenzielle Konfliktfahrzeuge übersehen werden können. |
| REK 3 | Eher radiale Zufahrten in den Kreisverkehr mit direkt nach dem Einfahrbereich stark abgelenkten Fahrlinien führen zu einer höheren Unfallrate von Fahrnfällen. | Es ist ein vergleichsweise harter Krümmungswechsel nach Einfahren auf die Kreisfahrbahn erforderlich; bei höheren Geschwindigkeiten oder ungewohnt stark radialer Einfahrt kann dies zu einem Auffahren auf die Kreisinsel führen. |

Tabelle 4.4: Risiko-Entwurfs-Konstellationen und Erklärungsansätze

Bei den beiden Konstellationen REK 2 und REK 3 deutet sich ein Zielkonflikt an, da sowohl eine zu stark tangentiale als auch eine zu stark radiale Führung der Zufahrt unfallbegünstigend wirkt und aus den jeweiligen Gesichtspunkten zu vermeiden ist. Es stellt sich die Frage, wie ein solcher Zielkonflikt gelöst werden kann:

- Eine mögliche Umsetzung kann darin bestehen, ein „mittleres“ Maß zwischen „tangential“ und „radial“ für die Zufahrtsgestaltung anzustreben.
- Eine weitere Möglichkeit zur Vereinbarkeit der Anforderungen bietet sich in einer „Abfolge“: Auf einen ersten, sinnvollerweise radialen Abschnitt in der Zuführung erfolgt im Übergang zur Kreisfahrbahn ein Tangentialanteil der Führung (bspw. in Form einer leichten Führung der Fahrlinie nach rechts in die Kreisfahrbahn hinein). Dieses Prinzip kann anschaulich bspw. über die heute schon in den RAL vorgegebenen, rechteckig-länglichen und nicht zu

breiten Fahrbahnteiler mit einer geeigneten, möglicherweise eher kleinen Ausrundung des rechten Fahrbahnrandes und einer insgesamt auf die Kreisinselmitte ausgerichteten Fahrbahnachse umgesetzt werden (vgl. Bild 2.2). Dieses Prinzip müsste aber insgesamt streng umgesetzt werden.

Womöglich ist es nicht erforderlich, sich dezidiert für eine dieser beiden Vorgehensweisen zu entscheiden. In jedem Fall sind Kenngrößen anzustreben, mit denen die Gestaltung einer Zufahrt dahingehend geprüft werden kann, ob der Entwurf für eine der genannten Risiko-Konstellationen anfällig ist. Denn insgesamt wird deutlich, dass weniger einzelne oder gar isolierte geometrische Größen für kritische Fälle maßgeblich sind, sondern das durch das Zusammenspiel der Entwurfselemente entstehende, fahrdynamisch ungünstigste Fahrverhalten. Gerade wichtige Fahrverhaltenscharakteristika während der Zu- und Einfahrt können aber nur anhand der Infrastruktur nicht geeignet abgebildet werden; somit werden also weiterführende Informationen zum Fahrverhalten erforderlich, wie z.B. Geschwindigkeits- und Fahrlinienverläufe sowie Lenk- und Verzögerungsverhalten.

5 Fahrverhaltensuntersuchung an ausgewählten Kreisverkehren

5.1 Methode

Auf der Basis von luftgestützten Videoerhebungen an Kreisverkehren werden Fahrverhaltensinformationen von Fahrzeugen, die den Kreisverkehr durchfahren, gewonnen. Die erhobenen Daten umfassen grundsätzlich Weg- und Zeitinformationen der Fahrzeuge, aus denen Fahrverhaltensparameter (wie Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bzw. Verzögerungen) abgeleitet werden können. Die Gesamtheit aller Daten eines Fahrzeugs kann dabei als Verlauf die Entwicklung bspw. des Geschwindigkeitsverhaltens während der Kreisdurchfahrt abbilden. Ein Vergleich solcher Verläufe ist aufgrund der linienhaften Darstellung vorrangig auf einer deskriptiven Ebene möglich. Für die vertiefte Analyse werden daher an festen Punkten „Messstellen“ definiert, um Vergleiche der Kreisverkehrsdurchfahrten untereinander zu ermöglichen, auch wenn prinzipiell ausführlichere Daten vorliegen, die aber alleine durch ihre Quantität im Vergleich untereinander nicht weiterhelfen. Komplette makroskopische Vergleiche ausgewählter Fahr- oder Geschwindigkeitsverlaufslinien kommen in einer vorgeschalteten Ebene, die primär zum Erkennen der vertieft zu untersuchenden Bereiche dient, geeignet zum Einsatz.

5.2 Auswahl, Erhebung und Datengenerierung

5.2.1 Auswahlkriterien

Die gewählte Erhebungsmethode, den Verkehr während der Kreisdurchfahrt aus der Luft mit einem UAV videobasiert zu erfassen, wird an fünf Kreisverkehren angewandt. Bei der Auswahl der Kreisverkehre wird darauf geachtet, sowohl drei- als auch vierarmige Anlagen einzubinden, sowie neben „regelmäßigen“ Entwurfseigenschaften auch verschiedene Arten von „Unregelmäßigkeiten“ abzubilden (vgl. Tabelle 5.1). Diese fünf Kreisverkehre bilden das Kollektiv 1.4. Außerdem wird Wert darauf gelegt, dass das Kollektiv sowohl unfallunauffällige als auch unfallauffällige Arme beinhaltet. Luftaufnahmen der Kreisverkehre mit skizzierten Unfalltypensteckkarten finden sich in Anlage 14.8.

Weiterhin waren bei der Auswahl der fünf Kreisverkehre zudem genehmigungsrechtliche Einschränkungen zum jeweiligen Erhebungszeitpunkt (September 2016 bzw. 2017) zu beachten:

- Flughöhe 100 m (zum Erhebungszeitpunkt rechtlich ohne Ausnahmegenehmigungen in Deutschland bzw. Baden-Württemberg maximal zulässige Flughöhe)
- Standort in einem geeigneten Quadranten in ausreichendem Sicherheitsabstand zu den Verkehrsflächen (ein Standort über der Kreisinsel gilt als „über Verkehrsflächen“ und ist nicht zulässig)
- Genehmigungen der Behörden bzw. der betroffenen Grundstückeigentümer (Fläche der Bodenstation)

Als weitere Randbedingungen waren zu beachten:

- Einmessen bekannter Punkte der Kreisverkehrsinfrastruktur und ausgelegter Passpunkte mit geodätischen Instrumenten (umgesetzt als lokales Koordinatensystem).
- Aufstieg des UAV idealerweise etwas abgesetzt von der Örtlichkeit des Kreisverkehrs oder geschützt durch Bewuchs o.ä., um die Fahrzeugführer möglichst wenig abzulenken.

| Kreisverkehr Nr. / Lage (Gemeinde) | Anzahl Arme | Verbale Beschreibung der Anlagencharakteristik | KU ₂₀₀ -Eigenschaften (gerundet) [gon/10m] | DTV [Kfz/24h] |
|--|-------------|---|---|---------------|
| (1) Karlsruhe-Neureut (interne Nr. 131) | 4 | Eher regelmäßiger Aufbau mit zentraler Lage der Kreisinsel | 24; 24; 24; 24 | 10.900 |
| (2) Oberderdingen-Flehingen, Luisenhof (interne Nr. 112) | 4 | Leicht unregelmäßiger Aufbau, Kreisinsel leicht außermittig, Zufahrtsachsen kreuzen sich nicht rechtwinklig | 16; 16; 24; 24 | 3.950 |
| (3) Ubstadt-Weiher (interne Nr. 119) | 4 | Stark unregelmäßiger Aufbau mit deutlich außermittiger Kreisinsel, Zufahrten stark variierend geführt | 8; 32; 32; 40 | 18.400 |
| (4) Ringsheim (interne Nr. 553) | 3 | Eher regelmäßiger Aufbau, zentrale Kreisinsel mit sich rechtwinklig kreuzenden Straßenachsen, eher dreiecksförmige Fahrbahnteiler | 23; 23 | 17.800 |
| (5) Pfinztal-Söllingen (interne Nr. 116) | 3 | Stark unregelmäßiger Aufbau, Kreisinsel einseitig deutlich versetzt | 0; 41 | 12.600 |

Tabelle 5.1: Anlagenrelevante Auswahlkriterien für Kollektiv 1.4

5.2.2 Luftgestützte Erhebung

Für jeden Kreisverkehr wurde ein Erhebungstag angesetzt. Während die Aufnahmen beim Kreisverkehr (3) als Pilotversuch bereits im September 2016 stattfanden, wurden die übrigen vier Kreisverkehre im September 2017 befliegen. Vor Beginn der Aufnahmen wurden als Referenzpunkte fünf großformatige Markierungen im Schachbrettmuster ausgelegt. Einen beispielhaften Versuchsaufbau aus der Luft zeigt Bild 5.1.

In einem aus Fahrerperspektive möglichst unauffälligen Bereich im Seitenraum des Kreisverkehrs wurde eine Bodenstation eingerichtet, wo sich Start- und Landeposition des UAV befanden. Das UAV wurde jeweils durch mindestens zwei Personen bedient (Sichtkontrolle). Es wurde jeweils ein Quadrocopter Modell DJI Phantom 3 Advanced eingesetzt. Dieses UAV kann etwa 14 bis 16 Minuten ununterbrochen eine gewählte Position in der Luft beibehalten und muss anschließend zurück zur Bodenstation, um den Akku zu wechseln. Für den Auf- und Abstieg inkl. Akkuwechsel und Austausch der Speichermedien waren etwa fünf Minuten erforderlich. Die Auflösung wurde bei den Aufnahmen zunächst testweise variiert, aber im Regelfall mit bis zu 1.980 x 1.020 Pixel und mit einer Einzelbildrate von 24 bis 30 Frames pro Sekunde



Ausschnitt aus einer
Videosequenz des UAV am
Kreisverkehr (2)
Flehtingen-Luisenhof

Schwarz-weiße
Referenzpunkte

Bild 5.1: Beispielhafte Veranschaulichung des Untersuchungsaufbaus

eher hoch gewählt, um eine möglichst feine Auflösung zu erhalten, die im Hinblick auf die Dauer der Datenverarbeitung aber noch handhabbar war.

Für den Pilotversuch an Kreisverkehr (3) liegen insgesamt ca. 70 min Videomaterial vor. Im Rahmen der übrigen Erhebungen wurden die Kreisverkehre jeweils ca. von 07:00 Uhr bis 18:00 Uhr befliegen und etwa 30 Sequenzen mit rund 15 Minuten Dauer angefertigt, wodurch je Kreisverkehr etwa 7,5 Stunden auswertbares Videomaterial zur Verfügung stehen.

Abschließend wurden die Referenzpunkte sowie markante Punkte der Kreisverkehrsanlage eingemessen und ein lokales, zweidimensionales Koordinatensystem erstellt.

5.2.3 Technische Umsetzung der Datengenerierung

Ermitteln der Fahrverläufe (Trajektorien)

Die einzelnen Filme werden in handhabbare Sequenzen von ca. zwei Minuten Dauer unterteilt. Mittels eines hierzu entwickelten Tools in MATLAB werden die Videosequenzen zunächst stabilisiert, um z.B. durch Seitenwind verursachte Schwank- oder Drehbewegungen des UAV auszugleichen. Im folgenden Schritt werden die Filme in eine weitere Funktion des MATLAB-Tools eingelesen und Fahrzeuge während ihrer Fahrt durch den Kreisverkehr „getrackt“. Der hierbei zugrundeliegende Tracking-Algorithmus sucht dabei nach denjenigen Pixeln, bei denen sich von einem Videoframe zum nächsten die Farbe ändert, wie es bei einem sich bewegendem Fahrzeug vor einem unbeweglichen Hintergrund der Fall ist. Diese Punkte finden sich hauptsächlich entlang der Fahrzeugumrisse. Der jeweilige Ort des Fahrzeuges wird über den Schwerpunkt der solchermaßen festgestellten Begrenzungspunkte des Fahrzeugkörpers bestimmt. Die infolge der seitlichen Positionierung des UAV entstandene Verzerrung wird mit Hilfe der eingemessenen Referenzpunkte rechnerisch ausgeglichen. Die dementsprechend

ermittelte Datenreihe aus Koordinaten- und Zeitinformationen wird zur Weiterverarbeitung tabellarisch ausgegeben.

Auswerten der Fahrlinieninformationen

In der Microsoft Office-Anwendung Excel werden die eingelesenen Koordinaten- und Zeitinformationen der einzelnen Fahrzeuge zusammengeführt und mit den Koordinaten der Kreisverkehrsanlage überlagert, wodurch Geschwindigkeiten oder Fahrlinieninformationen sowohl als Verläufe als auch an diskreten Stellen zur Verfügung stehen. Insgesamt wurden über 3.700 Fahrzeuge eingelesen, wovon fast 1.400 unbehindert und geradeaus fahrende Fahrzeuge waren, die im Folgenden i.d.R. vertieft betrachtet werden.

5.3 Diskussion von Fahrlinieneigenschaften zur Eingrenzung des Untersuchungsumfanges

5.3.1 Allgemeines

Als Vorbereitung für die Auswertungen wird diskutiert, welche Informationen aus den Fahrverläufen in welcher Auflösung für das weitere Vorgehen benötigt werden. Dabei werden ausschließlich Pkw betrachtet. Im Vordergrund steht die Fragestellung, ob bestimmte Teile des Kollektivs, bestimmte Parameter an diskreten Stellen oder Verläufe über Abschnitte hinweg für die vertiefte Auswertung besonders relevant sind. Da in vorangegangenen Betrachtungen erkannt wurde, dass insbesondere der Geschwindigkeit ein hoher Einfluss auf das Sicherheitsniveau zugeschrieben wird, liegt hier der Fokus auf dem Geschwindigkeitsverhalten.

5.3.2 Identifikation aussagekräftiger Fahrlinien

Die beobachteten Fahrzeuge werden qualitativ anhand des Grades ihrer Beeinflussung durch andere Verkehrsteilnehmer in drei Gruppen eingeteilt. Von Interesse ist insbesondere eine Beeinflussung durch vorausfahrende bzw. kreuzende Fahrzeuge vor dem Hintergrund einer freien oder durch andere Fahrzeuge beeinflussten Geschwindigkeitswahl:

- „Frei fahrende“ Fahrzeuge unterliegen keinen offensichtlichen Beeinflussungen durch andere Verkehrsteilnehmer: In gleicher Richtung vorausfahrende Fahrzeuge oder sich auf der Kreisfahrbahn von links annähernde Fahrzeuge sind nicht vorhanden oder zumindest weit genug entfernt, um einen Einfluss auf das Fahrverhalten ausschließen zu können. Ob andere Fahrzeuge folgen, ist (selbst in Form eines Pulks) nicht von Belang.
- „Hinterher fahrende“ Fahrzeuge sind Folgefahrzeuge von anderen Fahrzeugen, welche wiederum „hinterher fahrende“ oder auch „frei fahrende“ Fahrzeuge sein können. „Hinterher fahrende“ Fahrzeuge unterliegen daher zwar einer Beeinflussung durch ein vorausfahrendes Fahrzeug, können aber ansonsten unbeeinflusst – insbesondere nicht beeinflusst von sich auf der Kreisfahrbahn annähernden Fahrzeugen – in die Kreisfahrbahn einfahren.

- „Aktiv verzögernde“ bzw. „anhaltende“ Fahrzeuge unterliegen einer Beeinflussung durch auf der Kreisfahrbahn von links kommende Fahrzeuge. Infolgedessen verzögern sie ihre Geschwindigkeit tlw. bis zum Stillstand, damit das Fahrzeug auf der Kreisfahrbahn vor ihnen vorbeifahren kann. Diese Fahrlinien werden in dieser Arbeit nicht vertieft analysiert.

Die Geschwindigkeiten für „frei fahrende“ Fahrzeuge liegen durchschnittlich um bis zu 5 km/h über denen von Fahrzeugen, die anderen Fahrzeugen folgen („hinterher fahren“), wie in Bild 5.2 zu sehen ist. Teilweise sind die höchsten gemessenen Geschwindigkeiten je Zufahrt auch in etwa gleich, aber naheliegenderweise nicht höher. Dafür weisen die Geschwindigkeiten der „Hinterherfahrer“ eine größere Streuung in niedrigeren Geschwindigkeitsbereichen auf (vgl. hierzu auch Anlage 14.9). Da somit davon auszugehen ist, dass das Fahrverhalten der „frei fahrenden“ Fahrzeuge durch das zumeist höhere Geschwindigkeitsniveau auch ein höheres Potenzial für kritische und dadurch unfallbegünstigende Fahrmanöver bietet, wird das Untersuchungskollektiv auf „frei fahrende“ Fahrzeuge eingegrenzt. Als weitere Eingrenzung werden nur sinngemäß geradeaus fahrende Fahrzeuge untersucht. Zum einen werden diese Fahrli-
nien durch die Überlagerung der Auswirkungen der „gefühlten“ Geradeausrichtung und der geringsten fahrlängenbezogenen Kurvigkeit aller Fahrrelationen als am anfälligsten für höhere und damit kritischere Geschwindigkeiten erachtet, zum anderen kann gerade durch ein solches kritisches Geschwindigkeitsverhalten auch ein Konflikt mit Einfahrenden an der nächsten Zufahrt entstehen bzw. verschärft werden.

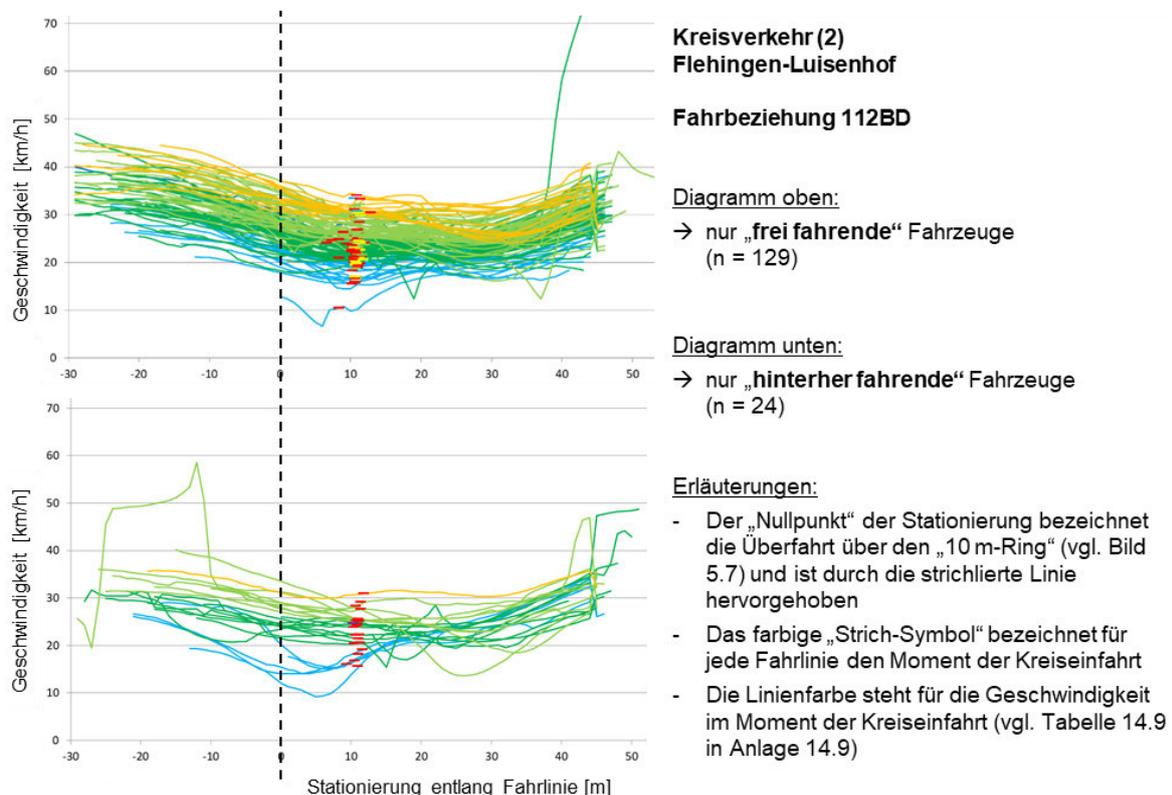


Bild 5.2: Geschwindigkeitsverlaufslinien von „frei fahrenden“ und „hinterher fahrenden“ Fahrzeugen im Vergleich

Rechtsabbiegende Fahrzeuge können naturgemäß nicht zu potenziellen Konfliktfahrzeugen an der Folgezufahrt werden. Auch kann bei Fahrurfällen mit Auffahren auf die Kreisinsel die ursprünglich beabsichtigte Fahrtrichtung anhand der Unfalldaten nicht rekonstruiert werden. Die abgeleitete Einschätzung, dass der durch eine vertiefte Analyse möglicherweise erwartbare Erkenntnisgewinn insgesamt in einem ungünstigen Verhältnis zum Aufwand stehen dürfte, wurde durch eine Betrachtung einiger Fahrlinienverläufe gestützt. In Summe wurde von einer weiteren Betrachtung der rechtsabbiegenden Fahrzeuge abgesehen.

5.3.3 Geschwindigkeits- und Verzögerungsverhalten

Bezüge zu Regelwerk und Literatur

Das Merkblatt der FGSV enthält einen „typischen“ Geschwindigkeitsverlauf für Kreisverkehre – allerdings ohne Hinweis auf die zugrundeliegenden Randbedingungen – für die Geschwindigkeitsquantile von 15, 50 bzw. 85 % bei geradeaus fahrenden Fahrzeugen (vgl. Bild 5.3). Demnach liegt die „typische“ V_{85} im Bereich der Zufahrt bzw. der ersten Hälfte der Kreisdurchfahrt bei etwa knapp 30 km/h. Für die V_{50} lässt sich entsprechend ein Geschwindigkeitsniveau von etwa 20 km/h ablesen. Das Regelwerk der Schweiz nennt als Zielgröße der Geschwindigkeiten in einem Kreisverkehr „ca. 20 bis 30 km/h“, die Niederlande verwenden maximale Geschwindigkeiten von 35 km/h, Frankreich von 50 km/h (vgl. Kapitel 2.2).

Im Rahmen des Forschungsprojektes von RICHTER UND HÜSKEN (1998) wurden auch Geschwindigkeitsmessungen auf der Kreisfahrbahn durchgeführt: Die gemessenen Geschwindigkeiten „bewegen sich überwiegend in einer relativ engen Bandbreite zwischen 30 und 38 km/h“.

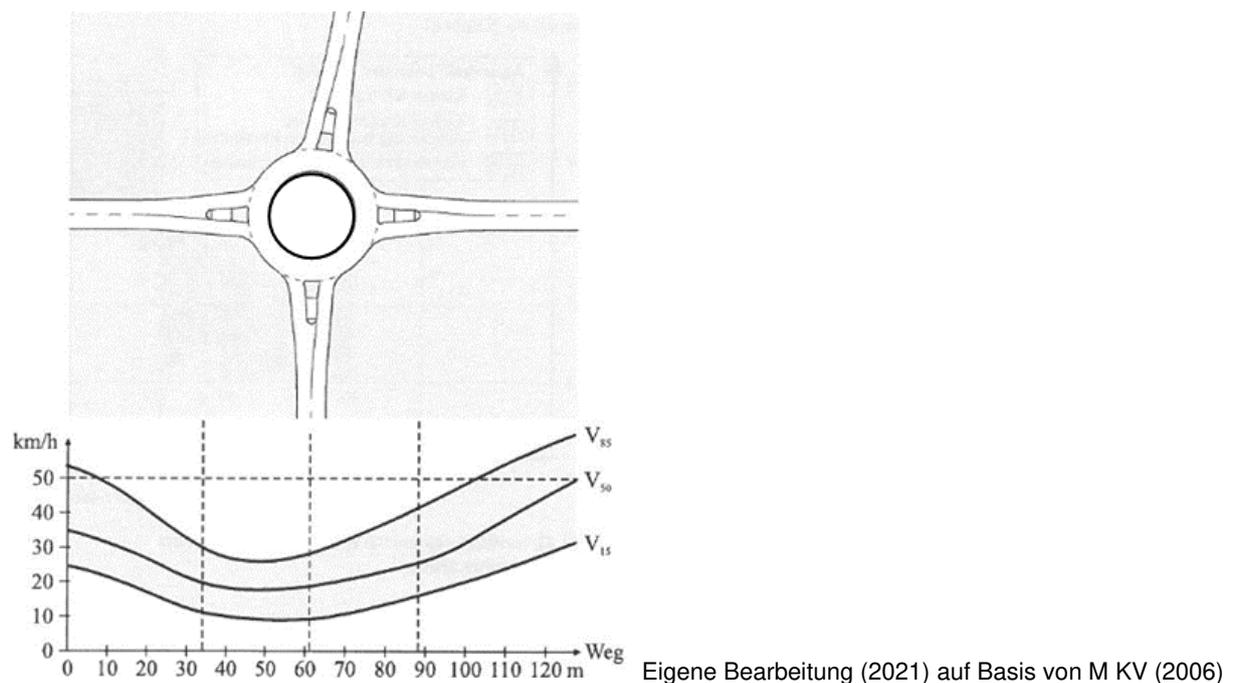


Bild 5.3: „Typisches“ Geschwindigkeitsverhalten gemäß FGSV-Merkblatt zu Kreisverkehren

Zum Verzögerungs- bzw. Beschleunigungsverhalten liegen aus Literatur und Regelwerken keine Angaben vor. Internationale Erkenntnisse werden im Folgenden nicht weiter einbezogen, da sich die Gestaltungsmerkmale dort tlw. so stark unterscheiden (vgl. Kapitel 2.2), dass ein detaillierter Abgleich von gefahrenen Geschwindigkeiten nicht zielführend erscheint.

Bezugspunkte und -abschnitte in Bezug auf das Geschwindigkeitsverhalten

Die deskriptive Betrachtung der Fahrlinienbündel je Zufahrt lässt erkennen, dass die Kreisverkehrsdurchfahrt in Geradeaus-Richtung in zwei Abschnitte unterteilt werden kann: Einen ersten Abschnitt im Verlauf der Zufahrt bis unmittelbar vor der Einfahrt sowie einen zweiten Abschnitt ab der Einfahrt auf die Kreisfahrbahn. Dieser zweite Abschnitt liegt räumlich gesehen vor der nächsten, unmittelbar folgenden Zufahrt (dies gilt für alle annähernd regelmäßigen, vierarmigen Kreisverkehre).

Jeder dieser beiden Abschnitte kann aus verschiedenen Gesichtspunkten besonders kritisch in Bezug auf das Geschwindigkeitsverhalten sein:

- Liegt im ersten Abschnitt eine zu hohe Geschwindigkeit in Bezug zur Anlagencharakteristik vor, können Fahrunfälle durch Auffahren auf Kreisverkehrselemente auftreten. Weiterhin können durch übermäßig schnell zufahrende Fahrzeuge auch EK-Unfälle begünstigt werden. Zufahrende Fahrzeuge sollten immer nur so schnell fahren, dass sie auf beide Situationen rechtzeitig reagieren können.
- Sind im zweiten Abschnitt die Geschwindigkeiten auf der Kreisfahrbahn z.B. höher als erwartet, können sie von Fahrzeugen, die an der folgenden Zufahrt zufahren, schlecht eingeschätzt werden, wodurch wiederum EK-Unfälle begünstigt werden. Auf der Kreisfahrbahn fahrende Fahrzeuge sollten nur so (schnell) fahren (können), dass sie von den zufahrenden Fahrzeugen jeweils richtig eingeschätzt werden können.

Geschwindigkeitsverhalten im ersten Abschnitt

Die Geschwindigkeit zufahrender Fahrzeuge muss aus fahrgeometrischen Gründen vor der Einfahrt in einen Kreisverkehr immer vermindert werden. Wird zudem auf der Kreisfahrbahn ein von links kommendes, bevorrechtigtes Fahrzeug als potenzieller Konfliktgegner erkannt, sollte das zufahrende und wartepflichtige Fahrzeug vor der Kreisverkehrseinfahrt zum Vermeiden einer Kollision zum Stehen kommen können. Dazu darf die Ausgangsgeschwindigkeit des zufahrenden Fahrzeugs nur so hoch sein, dass der verbleibende Weg bis zum Konfliktpunkt mindestens dem erforderlichen Anhalteweg entspricht. Der Anhalteweg eines Fahrzeugs berechnet sich aus der Addition von Reaktions- und Bremsweg (vgl. Formel (12) nach WEISE ET AL., 1997, dort als Haltesichtweite, entspricht dem Anhalteweg eines Kraftfahrzeugs).

$$S_h = S_1 + S_2 = \frac{V_1}{3,6} \cdot t_R + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{3,6^2 \cdot 2 \cdot a} \quad (12)$$

mit:

- S_h = Anhalteweg [m]
- S_1 = Weg während Reaktions- und Auswirkdauer [m]
- S_2 = Weg während des Bremsvorgangs [m]
- V_1 = Ausgangsgeschwindigkeit am Beginn der Bremsung [km/h]
- V_2 = Geschwindigkeit am Ende der Bremsung (hier = 0) [km/h]
- t_R = Reaktions- und Auswirkzeit [s]
- a = Bremsverzögerung [m/s^2]

Für Reaktions- und Auswirkzeit, aber auch für die Höhe der Bremsverzögerung liegen in der Literatur unterschiedliche Werte vor:

- Für Reaktions- und Auswirkzeit finden sich Werte zwischen 1,0 und 2,0 Sekunden: 1,0 s z.B. in M Uko (2012), 2,0 s in WEISE ET AL. (1997). In den RAS-L von 1995 wird die Reaktionszeit in Abhängigkeit von der Ausgangsgeschwindigkeit zu Grunde gelegt (ROOS ET AL., 2005): Mit der Begründung, dass der Fahrer bei einer langsameren Fahrweise „weniger konzentriert ist“, beträgt die reine Reaktionszeit für $V \leq 75$ km/h 1,8 s, für $V \geq 100$ km/h 0,8 s (jeweils muss noch die Auswirkzeit von 0,2 s addiert werden).
- Die Werte für die Bremsverzögerung streuen in der Literatur etwas mehr. So gibt der Allgemeine Deutsche Automobil-Club e. V. (ADAC) bei sehr günstigen Voraussetzungen bei Fahrbahn und Reifen Bremsverzögerungen bis $9 m/s^2$ an (ADAC, o.J.), im Regelwerk finden sich bspw. $6,5 m/s^2$ mit der Angabe „auf trockener Fahrbahn“ (M Uko, 2012). Empirisch wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes auf nasser Fahrbahn Verzögerungswerte von $4,3 m/s^2$ (mit ABS) und $3,7 m/s^2$ (ohne ABS) ermittelt (ROOS ET AL., 2005); diese Werte liegen bspw. auch den Bestimmungen der RAL (2012) zugrunde.

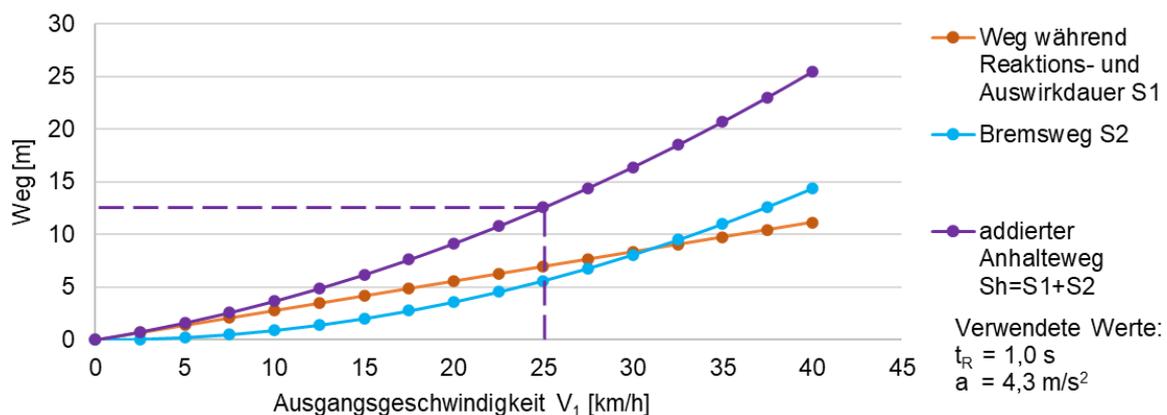


Bild 5.4: Anhaltewege in Abhängigkeit von der Ausgangsgeschwindigkeit V_1

Da vor einem Knotenpunkt selbst bei einem „plötzlich eintretenden“ Anhalteerfordernis eine gewisse Grundaufmerksamkeit des Fahrers vermutet werden kann (unterbewusste Bremsbereitschaft aufgrund „erwartbarer Ereignisse“ am Knotenpunkt), wird t_R im Folgenden mit 1,0 s angesetzt. Bereits 2015 waren alle Neu- und fast 90 % der Bestandsfahrzeuge in Deutschland mit ABS ausgerüstet (DAT, 2015); daher wird für das weitere Vorgehen eine Bremsverzögerung von $4,3 \text{ m/s}^2$ gewählt. Damit ergeben sich in Abhängigkeit von der Ausgangsgeschwindigkeit V_1 die in Bild 5.4 dargestellten Anhaltewege. Gemäß dem dort eingezeichneten Beispiel muss ein Fahrzeug, das zu Beginn der Reaktionszeit 25 km/h schnell fährt, ca. 12,5 m vor der Kreisfahrbahn den Anhaltvorgang mit maximaler angenommener Bremsverzögerung reaktiv einleiten, um noch vor der Kreisfahrbahn zum Stehen zu kommen.

Bild 5.5 zeigt für drei ausgewählte Geradeaus-Richtungen aus Kollektiv 1.4 die Geschwindigkeitsverläufe von „frei fahrenden“ Fahrzeugen, die vor der Einfahrt auf die Kreisfahrbahn verzögern, aber nicht anhalten. In manchen Fällen wird dabei die Geschwindigkeit nur vorübergehend vermindert und anschließend – i.d.R. leicht beschleunigend – in den Kreisverkehr eingefahren, tlw. verzögern die Fahrzeuge auch stärker bis zum (Fast-)Stillstand.

Dabei ist gut erkennbar, dass der Verzögerungsprozess oftmals gleichartig etwa 10 m vor der Kreiseinfahrt entweder verstärkt wird, um möglicherweise rechtzeitig vor der Kreiseinfahrt zum Stehen zu kommen, oder aufgegeben wird, um (anschaulich gesehen, z.B. nach einem Moment des Langsamerwerdens, um den Überblick zu gewinnen) ohne Anzuhalten in den Kreisverkehr einzufahren. Bei einer Entfernung von mehr als 10 m sind die Fahrlinienverläufe noch überwiegend parallel.

In Bild 5.5 wird zudem deutlich, dass die Verzögerung i.d.R. 30 bis 40 m vor der Kreiseinfahrt merklich ansetzt und 10 m vor der Kreisfahrbahn fast durchweg Geschwindigkeiten unter 30 km/h – davon überwiegend zwischen 20 und 25 km/h – vorliegen. Dies entspricht dabei in etwa den theoretischen Überlegungen aus Bild 5.4 (ein Anhalteweg von 10 m kann bei ca. 21,5 km/h umgesetzt werden)⁸.

Die qualitative Analyse der Fahrlinien in Bild 5.5 zeigt auf, dass die Position, an der ein Fahrzeugführer bei Bedarf einen zügigen Bremsvorgang einleitet, in etwa 10 m vor der Kreiseinfahrt liegt. Idealerweise könnte die Zufahrt eines Kreisverkehrs auf Grundlage dieser Sicherheitsüberlegungen so gestaltet sein, dass sich durch die bauliche Gestaltung ein Geschwindigkeitsniveau der zufahrenden Fahrzeuge von etwa 25 km/h in einem Abstand von gut 10 m

⁸ Dabei kommen tlw. auch Fahrzeuge mit $V \geq 30 \text{ km/h}$ vor der Kreisfahrbahn zum Stehen (vgl. Bild 5.5 unteres Diagramm); die Bremsverzögerung liegt dann entsprechend über den für Bild 5.4 zugrunde liegenden Annahmen. Zum Vergleich: Bei „frei fahrenden“ Fahrzeugen liegt die Geschwindigkeit beim Schnittpunkt des 10 m-Rings an den ausgewählten Zufahrten um bis zu 10 km/h höher (vgl. Bild 5.2).

vor der Kreisfahrbahn einstellt. So kann gemäß Bild 5.4 sichergestellt werden, dass ein Anhalten auch dann noch möglich ist, wenn die sich anbahnende Konfliktsituation vergleichsweise spät erkannt wurde. Diese Stelle eignet sich somit als „Referenzstelle“ für vertiefte Untersuchungen der Geschwindigkeit im „ersten Abschnitt“ der Kreisdurchfahrt.

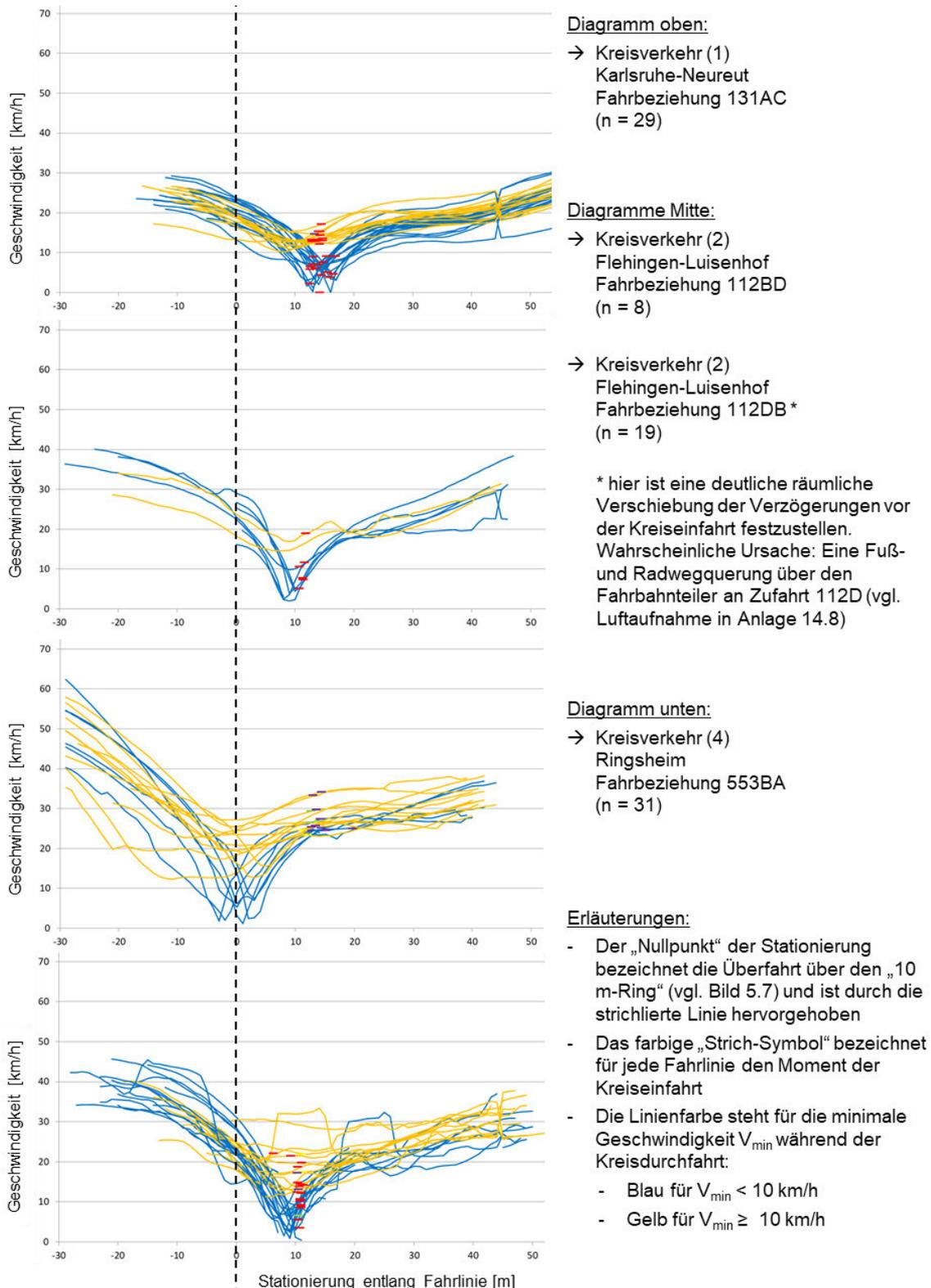


Bild 5.5: Geschwindigkeitsverlaufslinien von Fahrzeugen, die vor der Kreiseinfahrt verzögern

Geschwindigkeitsverhalten im zweiten Abschnitt

Ein zufahrendes Fahrzeug (1) sollte in der Lage sein, die Geschwindigkeit eines auf der Kreisfahrbahn fahrenden, bevorrechtigten Fahrzeugs (2) gut einschätzen zu können (vgl. Bild 5.6). Fahrzeug (2) zeigt – unabhängig davon, wo es in den Kreisverkehr eingefahren ist – etwa in der Mitte des links von Fahrzeug (1) liegenden Quadranten durch sein Blink- und Fahrverhalten an, ob es den Kreisverkehr verlassen möchte oder ob es tatsächlich zum potenziellen Konfliktfahrzeug eines zufahrenden Fahrzeugs wird. Die Einschätzung der Geschwindigkeit gelingt möglicherweise dann besser, wenn das Fahrzeug auf der Kreisfahrbahn mit einer vergleichsweise konstanten Geschwindigkeit fährt. Die Referenzstelle für die Geschwindigkeit im „zweiten Abschnitt“ ist dementsprechend auf der Kreisfahrbahn zu verorten, naheliegenderweise im Bereich zwischen der Zufahrt und der Ausfahrt des Folgearmes.

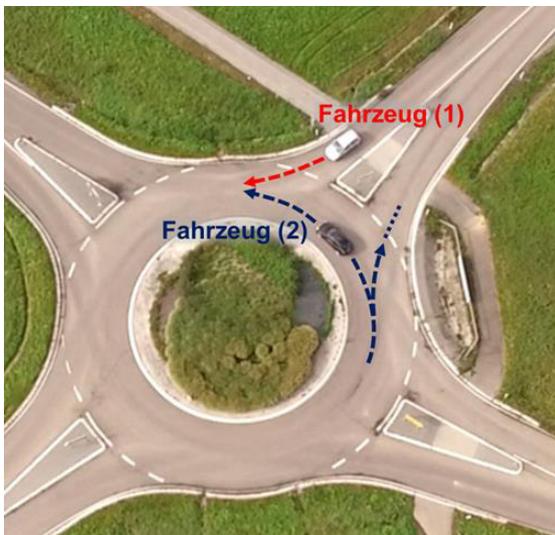


Bild 5.6: Zufahrendes Fahrzeug (1) und bevorrechtigtes Fahrzeug (2) in kritischer Konstellation

5.3.4 Zu- und Einfahrverhalten in den Kreisverkehr

Bezüge zu Regelwerk und Literatur

Zu den Grundsätzen der Knotenpunktgestaltung gehört es, Knotenpunkte unter der Anforderung der „Begreifbarkeit“ so zu gestalten, dass u.a. Vorfahrtregelungen und bauliche Gestaltungen aufeinander abgestimmt sind (vgl. WEISE ET AL., 1997). Die Zufahrt eines Kreisverkehrs soll in diesem Sinne dem Verkehrsteilnehmer signalisieren, dass er an eine für ihn mit verkehrlichem Nachrang verbundene Einmündungssituation geführt wird.

Die Verdeutlichung eines verkehrlichen Nachranges erreicht man allgemein durch Fahrbahnteiler (an Kreisverkehren grundsätzlich vorgesehen), durch ein möglichst senkrechtes Aufeinandertreffen der Straßenachsen sowie mit einer „Eckausrundung[, die] unter Berücksichtigung der fahrgeometrischen Anforderungen des Bemessungsfahrzeugs möglichst klein“ ausfallen soll (RAL, 2012). In Bezug auf Kreisverkehrszufahrten entspricht das letztgenannte

Kriterium am ehesten einer engen und „radialen“ Zuführung (vgl. Bild 2.9). Sehr radial gestaltete Zufahrten können allerdings sicherheitstechnische Defizite aufweisen, da eine Einfahrt u.U. nur mit sehr geringer Geschwindigkeit und starkem Lenkeinschlag umsetzbar ist. Radiale Zufahrten wurden in der Literatur u.a. in Verbindung mit größeren Kreisverkehrsradien tlw. kritisch bewertet, da „ein zügiges ‚Umkurven‘ der Kreismittelsinsel [...] damit bei größeren Radien kritisch“ sei (SPAHN UND BÄUMLER, 2007).

Bezug zu bisherigen Erkenntnissen dieser Arbeit

Direkt nach Einfahrt auf die Kreisfahrbahn muss der Verkehrsteilnehmer die Kreisinsel umfahren. Dies ist fahrgeometrisch sicherzustellen, ohne dass Parameter wie die Kreisfahrbahnbreite oder die Ausrundung der Zufahrt unverhältnismäßig große Werte annehmen. Daher erscheint es sinnvoll, neben einer grundsätzlich radialen Ausrichtung der Zufahrtsachse innerhalb der Zufahrt auch einen gewissen „Tangentialanteil“ in der Führung zu beachten, wofür unterschiedliche Ansätze denkbar sind (vgl. Kapitel 4.6.6). Möglicherweise ist es dabei günstig, den Tangentialanteil erst möglichst „spät“ anzuwenden, also unmittelbar vor der Kreiseinfahrt. Somit kann die Örtlichkeit mit dem eigentlichen Beginn des Lenkvorganges – der Beginn des Tangentialanteils – mit der voraussichtlich niedrigsten Geschwindigkeit möglichst nahe an der Örtlichkeit mit dem eventuellen Halteerfordernis – der Einfahrt – zu liegen kommen; eine solche Überlagerung unterstützt auch die Begreifbarkeit. Die Gestaltung der Zufahrt im unmittelbaren Nahbereich zur Kreisfahrbahn sollte demnach das Fahrzeug in einem engen Rechtsbogen auf die Kreisfahrbahn leiten, damit kein zu spitzer Einfahrtswinkel entsteht (keine zu tangentiale Führung, die zu einer schnellen Fahrweise verleitet). Neben diesen theoretischen Überlegungen zum Fahrverhalten von Pkw hilft ein tangentialer Aspekt im Nahbereich zur Kreisfahrbahn auch, um eine Sicherstellung der Befahrbarkeit für Gespanne oder Lkw zu gewährleisten. Daneben kann der Tangentialanteil in der Führung dazu dienen, Falschfahrten durch Linkseinbiegen auf die Kreisfahrbahn zu vermeiden. Zudem ist es angeraten, den Zu- und vor allem den Einfahrtbereich nicht stärker als fahrgeometrisch erforderlich aufzuweiten, denn es ist auch im Sinne der Begreifbarkeit, die Zahl der Entscheidungsmöglichkeiten zu reduzieren (vgl. WEISE ET AL., 1997). Bei sehr stark aufgeweiteten Zufahrten nutzt womöglich ein relevanter Teil der Fahrzeuge die schnellere, tangentiale Einfahrmöglichkeit. Weiterhin ist denkbar, dass sich schmale Fahrzeuge nebeneinander aufstellen, oder dass Zweiradfahrer rechts neben Pkw fahren und im Moment der Einfahrt, wenn sich ein Pkw zunehmend am rechten Fahrbahnrand orientiert, dann abgedrängt bzw. übersehen werden (Stichwort „toter Winkel“).

Insgesamt erscheint es zielführend, die Fahrzeuge in ihrer Fahrlinie möglichst straff zu führen, um ein hohes Verkehrssicherheitsniveau zu erreichen. Für Fahrlinien im unmittelbaren Bereich

der Zufahrt bedeutet dies zusammenfassend, dass die Fahrzeuge grundsätzlich zwar ausreichend radial, zur Kreisfahrbahn hin in einem gewissen Maße auch tangential geführt werden sollten („Tangentialanteil“). Daher ist das Fahr- und Lenkverhalten im unmittelbaren Bereich vor der Einfahrt auf die Kreisfahrbahn sowie in einem übergeordneten Maßstab zu untersuchen, was sich über den Parameter der Kurvigkeit abschnittsbezogen darstellen lässt. Ein weiterer Aspekt ist auf den Moment der Einfahrt z.B. hinsichtlich des Einfahrwinkels zu legen.

5.3.5 Ermittlung und Diskussion geeigneter Bezugspunkte

Für die beschriebenen Untersuchungsansätze ist es erforderlich, die Fahrlinie abschnittsweise oder deren Eigenschaften an konkreten Stellen zu betrachten. Hierfür werden einerseits deskriptive Segmente anhand einer charakteristischen „Idealfahrlinie“ und andererseits die Lage der relevanten Untersuchungsstellen in Bezug zur Kreisverkehrsanlage definiert.

Fahrlinienabschnitte

Auf Basis der Vorüberlegungen zeigt sich der Abschnitt der Fahrlinie, der sich unmittelbar vor der Einfahrt befindet, als geeignet für vertiefende Untersuchungen. Ein maßgeblicher Entscheidungspunkt für das Geschwindigkeitsverhalten befindet sich etwa 10 m vor der Kreiseinfahrt, also am Schnittpunkt der Fahrlinie mit einem zur Kreisinselmitte konzentrischen Ring, der einen gegenüber dem Außendurchmesser um 10 m größeren Radius aufweist. Dieser Ring wird im Folgenden als „10 m-Ring“ bezeichnet. Als vertieft zu betrachtender Anteil der Fahrlinie wird der Abschnitt gewählt, der sich vom Schnittpunkt mit dem „10 m-Ring“ bis zum Rand der Kreisfahrbahn (dem Moment der Einfahrt) erstreckt. Dieser Teil der Fahrlinie wird als Segment S1-10 bezeichnet. Eine übergeordnete Betrachtung der weiter gefassten Zu- und Einfahrtssituation soll auch vor- und nachgeschaltete Fahrlinienbereiche zu Segment S1-10 umfassen. Um eine vergleichbare Größenrelation für dieses Segment S1 zu erhalten, wird als Beginn (entsprechend dem „10 m-Ring“) der Schnittpunkt der Fahrlinie mit einem „20 m-Ring“ gewählt. Da anhand der Segmente fahrlinienbezogene Untersuchungen vorgesehen sind, wird als Ende von Segment S1 der erste Wendepunkt am Krümmungswechsel der Fahrlinie festgesetzt. Die vertiefte Betrachtung eines weiteren Segmentes, welches den „Gegenbogen“ der Fahrlinie vom ersten zum zweiten Wendepunkt bildet, hat sich in weiteren Untersuchungen als wenig zielführend herausgestellt und wird nur in Einzelfällen herangezogen (Segment S2). Die Betrachtung eines Ausfahrsegmentes (Segment S3) ist hier nicht erforderlich.

Zur Konstruktion der Fahrlinien-Segmente sind demnach drei zur Kreisinsel konzentrische Kreise erforderlich. Der innere dieser drei Kreise entspricht dem Außenradius der Kreisfahrbahn, der zweite hat einen um 10 m und der dritte einen um 20 m größeren Radius als der Außenradius des Kreisverkehrs (vgl. Bild 5.7). Unter Hinzuziehung der Fahrlinie sowie der Wendepunkte der Fahrlinie können die relevanten Segmente bestimmt werden:

- Segment S1: Abschnitt der Fahrlinie vom Schnittpunkt mit dem Kreis mit $R = R_A + 20 \text{ m}$ bis zum ersten Wendepunkt WP1
- Segment S1-10: Innerhalb von Segment S1 wird der mittlere Abschnitt zwischen dem Kreis mit $R = R_A + 10 \text{ m}$ und dem Schnittpunkt mit dem Außenkreis separat betrachtet (Fahrlinie innerhalb des „10 m-Rings“)
- Segment S2: Abschnitt der Fahrlinie auf der Kreisfahrbahn vom ersten Wendepunkt der Fahrlinie WP1 bis zum zweiten Wendepunkt der Fahrlinie WP2.

Messstellen

Zur Analyse des Fahrverhaltens werden fiktive Messstellen festgelegt, an denen jeweils die lokalen Kenngrößen der Fahrlinien ermittelt werden. Diese Messstellen werden in Bezug zur Kreisverkehrsinfrastruktur gesetzt, da die Längen der Fahrlinien insbesondere in Abhängigkeit von der Kreisverkehrsgeometrie variieren und ein relativer Vergleich von Fahrlinienabschnitten somit erschwert wird. Jeweils eine fiktive Messstelle befindet sich am Beginn (MS 1) und am Ende (MS 2) von Segment S1-10, da diesem Bereich ein hoher Einfluss auf das Fahrverhalten zugeschrieben wird. Durch die Lage von MS 2 am Schnittpunkt von Fahrlinie und äußerem Kreisfahrbahnrand können mit dieser Messstelle auch Eigenschaften der konkreten Einfahrtssituation abgedeckt werden.

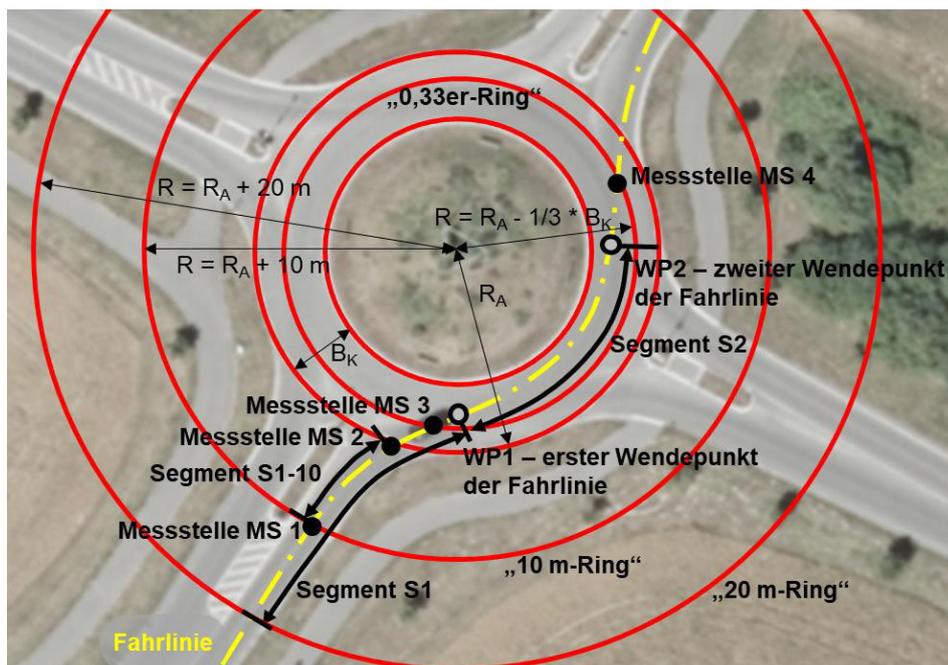


Bild 5.7: Unterteilung der Kreisdurchfahrt in Segmente und Bestimmung der Lage der Messstellen

Die Wendepunkte der Fahrlinien, die als Segment- und Berechnungsgrenze zwar geeignet sind, aber keinen festen Bezug zur Kreisverkehrsinfrastruktur haben, werden nicht als Messstellen herangezogen. Infolge der variierenden Lage und Winkel der Zufahrtsachsen scheidet eine Vielzahl der Konstruktionselemente des Kreisverkehrs als Bezugspunkte aus. Daher wird analog zur Konstruktion von „10 m-Ring“ bzw. „20 m-Ring“ das folgende Vorgehen angewandt, mit dem sich die Lageanforderungen zur Vergleichbarkeit der Messstellen für alle Anwendungsfälle reproduzierbar abbilden lassen: Es wird ein zum Kreismittelpunkt konzentrischer Kreis konstruiert, dessen Radius sich aus dem Außenradius des Kreisverkehrs abzüglich eines Drittels der Kreisfahrbahnbreite B_K bestimmt ($R = R_A - 1/3 \cdot B_K$). Die Schnittpunkte dieses „0,33er-Rings“ mit der Fahrlinie bilden die Messstellen MS 3 und MS 4. Vergleiche mit anderen Kenngrößen innerhalb der Befahrung der Kreisfahrbahn haben gezeigt, dass diese Punkte als Annäherung an die Lage der Wendepunkte dienen können. Sie bilden nicht nur Fahreigenschaften im Bereich der Wendepunkte ab, sondern zudem auch das Fahrverhalten im Bereich nach der Einfahrt auf die Kreisfahrbahn sowie im Bereich der Ausfahrt (der wiederum räumlich nach der im Fahrtrichtungssinn folgenden Zufahrt liegt).

Somit sind zur vergleichenden Analyse von Fahrlinieninformationen folgende Messstellen vorgesehen (vgl. Bild 5.7):

- Messstelle MS 1: Am Beginn von Segment S1-10 im Zufahrtsbereich vor der Kreisfahrbahn
- Messstelle MS 2: Am Ende von Segment S1-10 bzw. im Moment der Einfahrt
- Messstelle MS 3: Im Bereich nach Einfahrt auf die Kreisfahrbahn, erster Schnittpunkt der Fahrlinie mit dem „0,33er-Ring“
- Messstelle MS 4: Im Bereich gegenüber der im Fahrtrichtungssinn folgenden Zufahrt, zweiter Schnittpunkt der Fahrlinie mit dem „0,33er-Ring“

5.3.6 Zusammenfassung relevanter Untersuchungsinhalte

Eingrenzung des Kollektivs

- 1) Aufgrund des erkannten Geschwindigkeitsbezugs wird die Untersuchung auf das Verhalten „frei fahrender“ Fahrzeuge eingegrenzt.
- 2) Es werden ausschließlich Fahrzeuge untersucht, die den Kreisverkehr in Geradeaus-Richtung durchfahren.

Eingrenzung der zu untersuchenden Parameter

- 3) In den Auswertungen wird der Schwerpunkt auf Geschwindigkeitsbezüge gelegt, da erkannt bzw. bestätigt wurde, dass die Geschwindigkeit ein wichtiger Aspekt des Fahrverhaltens in Kreisverkehren ist.

- 4) Als vielversprechender Ansatz hat sich die Kurvigkeit der Fahrlinie herausgestellt. In den Diskussionen werden zudem Bezüge zum Fahr- und Lenkverhalten im unmittelbaren Vorfeld der Kreiseinfahrt hergeleitet, die sich über die Kurvigkeit der Fahrlinie darstellen lassen.
- 5) Es ist darüber hinaus von Interesse, ob sich andere Aspekte des Einfahrverhaltens in der Wahl der Geschwindigkeit widerspiegeln. Hierzu wird auch der Einfahrwinkel im konkreten Moment der Einfahrt betrachtet.

Bestimmung relevanter Bezugspunkte

- 6) In Bezug auf das Geschwindigkeitsverhalten weckt der Bereich der Fahrlinie innerhalb des „10 m-Rings“ bis zur Kreisfahrbahn (Fahrliniensegment S1-10) besonderes Interesse. Für übergeordnete Betrachtungen wird das größere Segment S1 herangezogen.
- 7) Die Geschwindigkeit und andere Eigenschaften werden an den Messstellen MS 1 bis MS 4 untersucht, damit jeweils genaue Vergleiche getroffen werden können.

5.4 Analyse des Fahrverhaltens auf Basis des Geschwindigkeitsverhaltens

5.4.1 Geschwindigkeitsverhalten allgemein

Bild 5.8 zeigt die Geschwindigkeiten V_{85} und V_{50} an den Messstellen MS 1 bis 4 je betrachteter Kreisverkehrsdurchfahrt in Geradeaus-Richtung. Das „typische Geschwindigkeitsverhalten“ aus dem FGSV-Merkblatt von 2006 (vgl. Bild 5.3) in Höhe von etwa 30 km/h für V_{85} und etwa 20 km/h für V_{50} wird jeweils als „Orientierungswert“ herangezogen. Im Vergleich zeigt sich, dass die Geschwindigkeiten insgesamt als „hoch“ bezeichnet werden können und auch über die einzelnen Zufahrten stark variieren. Für alle Messstellen können Differenzen von bis zu 15 km/h zu den Orientierungswerten beobachtet werden. Es fällt auf, dass die V_{50} den Orientierungswert nicht nur an fast allen Zufahrten überschreitet, die relativen sowie absoluten Überschreitungen fallen auch deutlich höher aus als diejenigen der V_{85} . Auch wenn die

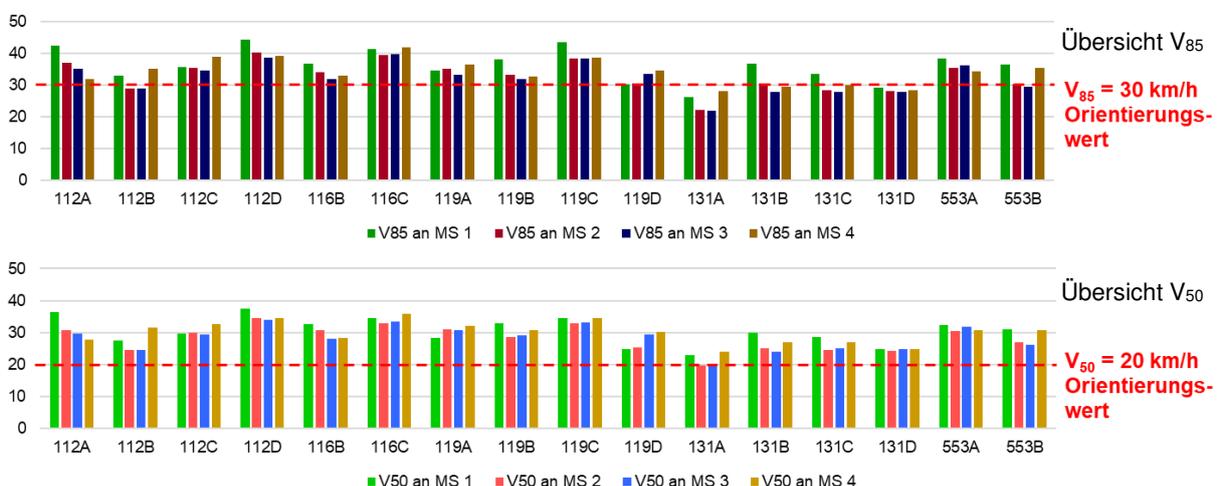


Bild 5.8: Vergleich der festgestellten Geschwindigkeiten an den Messstellen

Geschwindigkeiten im Vergleich zu den Messungen von RICHTER und HÜSKEN (1998) nur wenig abweichen, so erstaunen die vergleichsweise hohen Werte für V_{50} . Nur an einer Zufahrt werden die Orientierungswerte der Geschwindigkeiten annähernd eingehalten (131A). Außerdem ist bei Zufahrt 119D auffällig, dass nur dort die Geschwindigkeiten von MS 1 bis MS 4 stetig zunehmen. Beim Betrachten der Geschwindigkeitsverlaufslinien zeigt sich, dass an einigen Zufahrten ca. 40 m vor der Einfahrt Geschwindigkeiten von rund 70 km/h anzutreffen sind; dies gilt für die Zufahrten 112A, 112D, 119B, 119C, 131B und 131C (vgl. Anlage 14.9).

5.4.2 Geschwindigkeitsverhalten und Geometrie

Für alle Parameter, die auch in der Unfallkenngrößenanalyse betrachtet wurden, wird jeweils eine eigene Gegenüberstellung mit den V_{85} -Geschwindigkeiten an den Messstellen MS 1 bis 4 aufgestellt.

Die Art und Qualität der Abhängigkeit wird in allen Fällen mit linearen oder quadratischen Regressionskurven überprüft (vgl. hierzu die Abbildungen in Anlage 14.10). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass lineare Abhängigkeiten der Entwurfs- bzw. Geometrieparametern zum festgestellten Geschwindigkeitsverhalten nur äußerst schwach ausgeprägt sind. Der Unterschied zwischen linearen und quadratischen Zusammenhängen ist dabei insbesondere von Interesse, um stetig steigende oder fallende Entwicklungen von Zusammenhängen mit lokalen Extrema abzugrenzen. Es werden folgende Stufen zur qualitativen Beurteilung – unter Berücksichtigung der Einschätzung zum R^2 -Wert von PFLIEGER (2014) – festgelegt:

- „Leichter“ linearer bzw. quadratischer Zusammenhang: An mindestens zwei Messstellen Regressionskurven mit $R^2 \geq 0,15$
- „Mittlerer“ linearer bzw. quadratischer Zusammenhang: An mindestens zwei Messstellen Regressionskurven mit $R^2 \geq 0,30$
- „Starker“ linearer bzw. quadratischer Zusammenhang: An mindestens zwei Messstellen Regressionskurven mit $R^2 \geq 0,50$.

Ein demgemäß leichter linearer Zusammenhang kann nur für die Breite des Fahrbahnteilers B_{FT} , die in keinem Kreisverkehrsregelwerk eine relevante Bezugsgröße ist, beobachtet werden: Mit zunehmenden B_{FT} steigen die Geschwindigkeiten an den Messstellen MS 2 bis 4 tendenziell an (vgl. Bild 14.23). Für keinen untersuchten Parameter und somit für kein „typisches“ Entwurfselement eines Kreisverkehrs konnte ein auch nur leichter linearer Zusammenhang zur Geschwindigkeit an MS 1 festgestellt werden.

Die quadratischen Regressionskurven zeigen teilweise deutlichere Abhängigkeiten auf. Neben einem leichten quadratischen Zusammenhang für das Ablenkmaß A (vgl. Bild 14.32) zeigt sich ein mittlerer quadratischer Zusammenhang für die Fahrbahnteilerbreite B_{FT} mit jeweils ansteigenden R^2 -Werten für MS 1 bis 4. Die Breite des Fahrbahnteilers B_{FT} beeinflusst demnach die Geschwindigkeit im Bereich der Einfahrt und auf der Kreisfahrbahn: Je stärker B_{FT} das Maß von etwa 2,0 m überschreitet – das Mindestmaß allgemein beträgt 1,60 m, bei Querungsmöglichkeiten mehr, vgl. M KV (2006) –, desto förderlicher wirkt sich dies auf ein zügiges Fahrverhalten aus (V_{85} über 30 km/h). Ein Maximum von 35 bis 37 km/h stellt sich etwa bei einer Breite von rund 4,0 bis 5,0 m ein; bei sehr breiten Fahrbahnteilern sinkt das Geschwindigkeitsniveau wieder ab, aber nicht mehr unter 30 km/h (vgl. Bild 5.9 bzw. Bild 14.26).

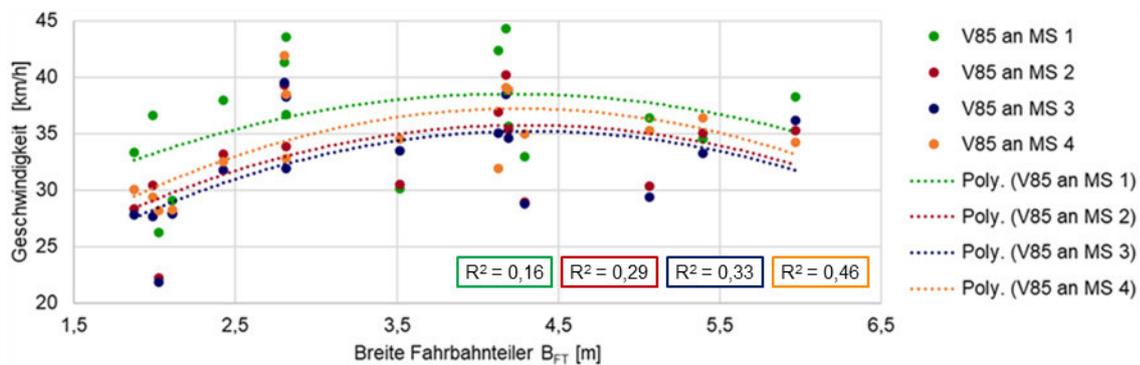


Bild 5.9: Quadratische Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Breite des Fahrbahnteilers B_{FT}

Für den Winkel α_{CH} zeigt sich, dass die im Schweizer Regelwerk empfohlenen 80 bis 90 gon im Kollektiv 1.4 nicht erreicht werden. Es ist jedoch erkennbar, dass für $\alpha_{CH} > 70$ gon die Geschwindigkeiten deutlich sinken, während sie bei rund 55 bis 70 gon Maximalwerte von über 35 km/h aufweisen; dabei ist ein mittlerer quadratischer Zusammenhang erkennbar (vgl. Bild 14.34). Auch für den Winkel β_{CH} streuen die Werte in Kollektiv 1.4 stark (zwischen 8 und 121 gon). Die quadratische Regression bietet zwar einen guten R^2 -Wert von 0,35 für V_{85} an MS 4, verfehlt jedoch das Kriterium für einen mittleren quadratischen Zusammenhang. Anhand der Regressionskurven ist ableitbar, dass bis etwa $\beta = 80$ gon die Werte für die Geschwindigkeiten zunächst fallen und sich anschließend für größere β wieder höhere Geschwindigkeiten einstellen. Die Güte des Zusammenhangs steigt hier mit der Reihenfolge der Messstellen entlang der Fahrlinie an (vgl. Bild 14.35). Da β_{CH} den Einfluss der Kreisinsel auf die Fahrlinie im mittleren Bereich der Geradeaus-Durchfahrt abbildet, wird ein ähnliches Vorgehen an der Ablenkung A und dem Ablenkmaß A / B_z getestet. Es lassen sich für A leichte quadratische Abhängigkeiten modellieren (jedoch tlw. mit geringeren R^2 -Werten als denen für β_{CH}); das Kriterium für einen Zusammenhang wird bei A / B_z knapp verfehlt (vgl. Bild 14.32 und Bild 14.33).

Zusätzlich wird der örtliche Einfluss der Geometrieparameter jeweils auf seine unmittelbare Lageumgebung deutlich: B_{FT} und α_{CH} beeinflussen das Geschwindigkeitsniveau im Bereich

der Einfahrt (MS 2) bzw. unmittelbar darauf (MS 3), β_{CH} wirkt sich am stärksten auf Geschwindigkeiten auf der Kreisfahrbahn aus (MS 4, etwas schwächer an MS 3). Aus diesen Auswertungen können folgende Zusammenhänge von Entwurfparametern und der Geschwindigkeit hergeleitet werden:

- Das Geschwindigkeitsniveau an Kreisverkehren hängt i.d.R. nicht direkt von einzelnen Entwurfsgrößen ab, die als Grundlagen für den Entwurf in den Regelwerken aufgeführt sind.
- Der im Schweizer Regelwerk verankerte Einfahrwinkel α_{CH} beeinflusst die Geschwindigkeit im Bereich der Einfahrt und auf der Kreisfahrbahn: Wenn er eher klein ist (55 bis 70 gon), wirkt er sich förderlich auf ein zügiges Fahrverhalten aus (V_{85} bis über 35 km/h).
- Die Abhängigkeit vom Winkel β_{CH} (ebenfalls aus dem Schweizer Regelwerk) zur Geschwindigkeit zeigt für Werte von etwa 60 bis 100 gon die relativ niedrigsten Geschwindigkeiten auf der Kreisfahrbahn (etwa 30 bis 33 km/h); größere sowie kleinere Werte fördern höhere Geschwindigkeiten.

Insgesamt weist das Geschwindigkeitsverhalten eher schwache Abhängigkeiten von den Entwurfparametern auf. Eine Ursache wird darin gesehen, dass in Kollektiv 1.3 viele vergleichsweise großzügige Entwurfparameter vorliegen (vgl. z.B. Bild 4.5 oder Bild 4.10), wodurch die Fahrlinie wenig streng geführt wird; eine weitere darin, dass sich ein komplexes, mehrschichtiges Verhalten wie das Fahrverhalten an Kreisverkehren mit sich überlagernden Lenk- und Beschleunigungsvorgängen nur schwer auf einzelne Entwurfparameter zurückführen lässt.

Ein Aspekt ist hervorzuheben: Obwohl die statistischen Zusammenhänge nicht stark sind, so sind gerade die beiden Parameter Fahrbahnteilerbreite B_{FT} und der Winkel α_{CH} deutliche und anschauliche Indizien, dass sich hier ein jeweils ähnlicher Fahrlinienaspekt Geltung verschafft, nämlich die Ablenkung der Fahrlinie weg von der Achse der zuführenden Straße – mithin ein Maß für die „Tangentialität“ der Einfahrt!

5.4.3 Geschwindigkeitsverhalten und Lenkverhalten

Aus der Summe der Krümmungen über die Länge der Fahrlinie wird jeweils die Kurvigkeit für die drei Segmente S1, S2 und S1-10 berechnet (KU_{S1} , KU_{S2} und KU_{S1-10}). Diese Kurvigkeiten entsprechen den „gefahrenen Krümmungen“ der Fahrzeuge in diesen Fahrlinienabschnitten und werden zur besseren Anschaulichkeit stets in der Einheit gon/10 m angegeben. Sie dienen zur Analyse der Fahrlinieneigenschaften auf Basis der abschnittsbezogenen Kurvigkeit. Aus den erfassten Daten werden die Quantilswerte für 15 und 50 % sowie insbesondere das im Straßenwesen erprobte 85 %-Quantil ermittelt. Um die Güte der statistischen Zusammenhänge zu bewerten, werden die gleichen Kriterien wie in Kapitel 5.4.2 herangezogen.

Makroskopische Untersuchungen zum Lenkverhalten

In einem ersten Schritt wird das Lenkverhalten im Bereich der Zufahrt untersucht, indem jeweils die o.a. Quantilswerte für die gefahrene (gemessene) Kurvigkeit in den Segmenten S1 bzw. S1-10 herangezogen werden. Der Wert des 15 %-Quantils der Kurvigkeit (das für jede Zufahrt die kleinsten gefahrenen und somit fahrbaren Kurvigkeiten repräsentiert) ist für S1-10 im Schnitt relativ gesehen etwas größer als für Segment S1. Bei den 85 %-Quantilswerten liegt hingegen der gefahrene Kurvigkeitswert im Segment S1 (der bei diesem Quantil die insgesamt größere Kurvigkeit, also stärkere Krümmungen und mithin einen stärkeren Lenkeinschlag repräsentiert) im Regelfall höher als in Segment S1-10 (vgl. Bild 14.37 in Anlage 14.11). In Fällen, in denen die Zufahrt mit einer insgesamt geringen Kurvigkeit befahrbar ist, konzentriert sich diese also vor allem in einem engeren Bereich vor der Kreisverkehrseinfahrt, der in dieser Auswertung durch den „10 m-Ring“ dargestellt ist. Wenn das Lenkerfordernis höher ist als zunächst angenommen und infolgedessen stärker bzw. nachkorrigierend eingelenkt werden muss, kann dies zu kritischen Situationen führen – insbesondere dann, wenn die Geschwindigkeit hierfür nicht angepasst ist. Weitere Untersuchungen zum Lenkverhalten werden daher vor allem auf KU_{S1-10} fokussiert (vgl. Anlage 14.12).

Für die Kurvigkeit KU_{S1-10} können oftmals starke lineare Zusammenhänge zur Geschwindigkeit festgestellt werden. Dieser Zusammenhang ist vor allem für das 15 %-Quantil der Kurvigkeit zum 85 %-Quantil der Geschwindigkeit an allen vier Messstellen ausgesprochen stark (R^2 zw. 0,56 und 0,80; vgl. Bild 5.10); für das 50 %- bzw. das 85 %-Quantil der Kurvigkeit bleiben die Zusammenhänge insgesamt stark, wenn auch weniger deutlich (vgl. Bild 14.41 bis Bild 14.43 in Anlage 14.12). Auch für die Kurvigkeit des größeren Segmentes KU_{S1} ist dieser Zusammenhang noch als stark anzusehen, allerdings weniger kräftig und für KU_{S2} insgesamt nur sehr schwach. Die niedrigsten gefahrenen (fahrbaren) Kurvigkeiten im unmittelbaren Zufahrtsbereich sind also maßgeblich für das obere Geschwindigkeitsniveau in weiten Teilen des Kreisverkehrs.

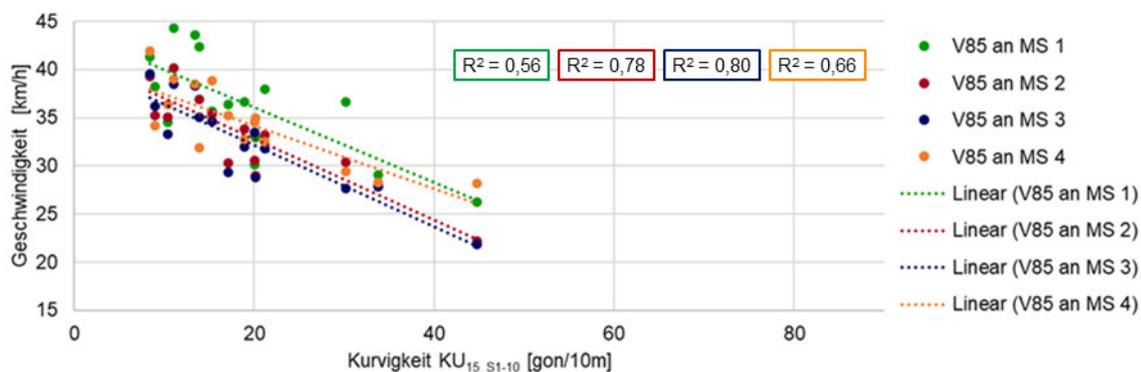


Bild 5.10: Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und die Kurvigkeit KU_{15} im Segment S1-10

Niedrigere Geschwindigkeiten (repräsentiert durch V_{15}) werden entsprechend durch die 85 %-Quantile der Kurvigkeit in den beiden Segmenten S1-10 und S2 maßgeblich bestimmt, wobei

die R^2 -Werte für das Teil-Segment S1-10 durchweg höher sind. Es liegt jeweils ein starker linearer Zusammenhang vor; die höchsten Korrelationen treten dabei an MS 2 und 3 auf (vgl. Bild 5.11 bzw. Bild 14.38 bis Bild 14.40 in Anlage 14.12). Für Geometrie Größen (wie z.B. für A oder β_{CH}) wird bei beiden Geschwindigkeitsquantilen i.d.R. nicht einmal ein leichter linearer Zusammenhang erkennbar.

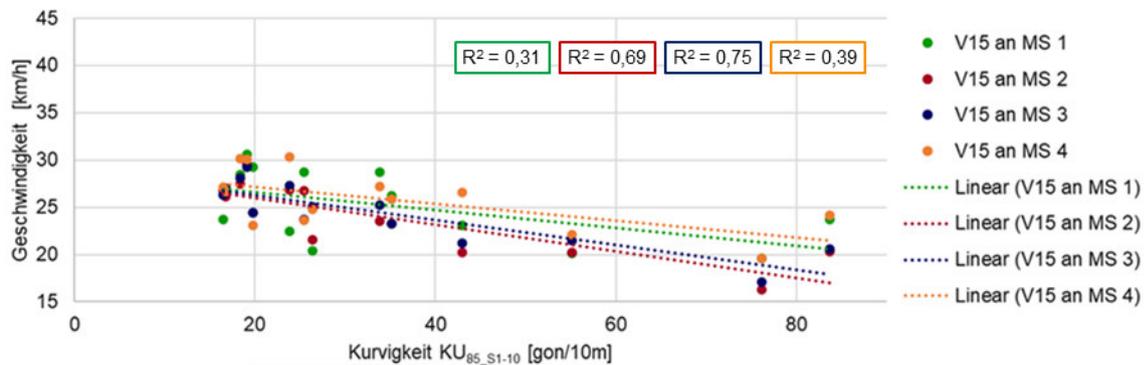


Bild 5.11: Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{15} und die Kurvigkeit KU_{85} im Segment S1-10

Da hinsichtlich des Einflusses der Entwurfsparameter auf das Geschwindigkeitsverhalten u.a. für den Winkel α_{CH} die relativ stärksten Zusammenhänge erkennbar werden, wird der Einfahrwinkel der Fahrlinie zur Kreisfahrbahn mit untersucht. Dieser weist, wenn er über alle gemessenen Werte betrachtet wird, nur schwache Zusammenhänge mit dem Geschwindigkeitsverhalten auf. Jedoch fallen zwei Zufahrten ins Auge, die äußerst tangentialen Einfahrwinkel um 25 gon zulassen (119A und 553A). Werden diese ausgeklammert, so ergibt sich für das 15 %-Quantil der verbleibenden Einfahrwinkel ein starker und für das 85 %-Quantil ein kräftig ausgeprägter mittlerer linearer Zusammenhang zur V_{85} : Für größer werdende Einfahrwinkel – die einen größeren Lenkbedarf erfordern – sinkt die V_{85} deutlich (vgl. Bild 14.45 in Anlage 14.12.2).

Mikroskopische Untersuchungen

Um die Kurvigkeiten bei relativ hohen Geschwindigkeiten zu analysieren, wird auf einer mikroskopischen Untersuchungsebene an vier ausgewählten Kreisverkehrszufahrten die V_{85} an den Messstellen MS 2 und MS 3 mit den KU_{S1-10} -Werten jeweils fahrtgenau überlagert. Es zeigt sich an beiden Messstellen, dass höhere gefahrene Geschwindigkeiten tendenziell mit kleineren gefahrenen Kurvigkeiten der Fahrlinien einhergehen (vgl. Bild 5.12). Weiterhin nimmt die Spannweite zwischen V_{15} und V_{85} an MS 3 ab, wenn die Kurvigkeiten KU_{S1-10} kleiner werden: Die Möglichkeit, eine Zufahrt „krümmungsoptimiert“ zu befahren, wird offenbar genutzt und bewirkt insgesamt eine relative Harmonisierung des Geschwindigkeitsniveaus. Ein Zusammenhang zum Geschwindigkeitsniveau kann nicht hergeleitet werden (vgl. Bild 14.46 in Anlage 14.12.3).

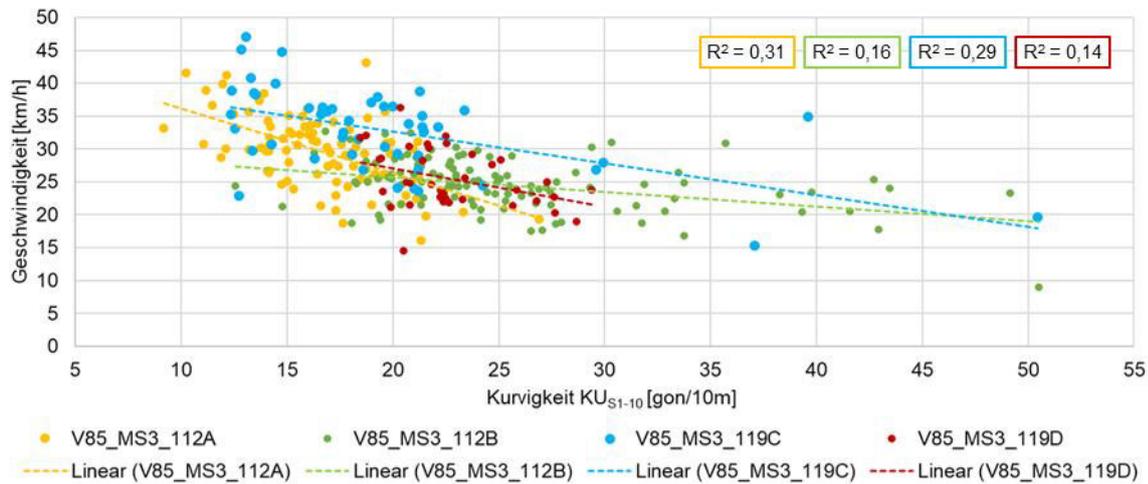


Bild 5.12: Fahrtgenauer Vergleich von Geschwindigkeit V_{85} und Kurvigkeit KU_{S1-10} (MS 3, ausgewählte Zufahrten)

Fazit

Die Erkenntnisse zum Zusammenspiel von Lenk- und Fahrlinieneigenschaften und der Geschwindigkeit umfassen die folgenden Aspekte:

- Mit zunehmender Kurvigkeit der Fahrlinie vor dem Erreichen der Kreisfahrbahn sinkt die dort gefahrene Geschwindigkeit.
- Die Lenk- und Fahrlinieneigenschaften unmittelbar vor der Zufahrt üben die maßgeblichsten Einflüsse auf das Geschwindigkeitsverhalten in diesem Moment aus. Zudem strahlen diese Einflüsse auf die folgenden Abschnitte der Kreisdurchfahrt aus. Dies gilt sowohl für Einflüsse durch Krümmungen der Fahrlinien als auch durch den Einfahrwinkel.
- Die beobachteten Geschwindigkeitsspannweiten zwischen V_{15} und V_{85} sind dann am kleinsten, wenn die Fahrzeuge nur geringe erforderliche Kurvigkeiten fahren müssen.
- Die niedrigsten Geschwindigkeiten treten bei großen Kurvigkeiten bzw. großen Einfahrwinkeln auf. Es ist jedoch insbesondere bei den Kurvigkeiten anzumerken, dass dieser relativ größte Wert nur auf ein kurzes Wegestück unmittelbar vor der Einfahrt bezogen ist – es handelt sich also um eine Fahrweise, deren Fahrlinie im Nahbereich zur Kreiseinfahrt größere Krümmungen aufweist. Mithin muss sie im Vorfeld zu diesem Nahbereich deutlich weniger gekrümmt, also radialer geführt worden sein. Dies ist als wichtiges Indiz zu sehen, dass hier der in Kapitel 4.6.6 theoretisch eingeführte und in Kapitel 5.3.4 aufgegriffene „Tangentialanteil“ der Führung unmittelbar vor der Kreisfahrbahn in der Praxis beobachtet wurde – und dass tatsächlich dann die niedrigen Geschwindigkeiten auftreten!

5.4.4 Geschwindigkeits- und Lenkverhalten auf der Kreisfahrbahn

Auf der Kreisfahrbahn (Segment S2) korrelieren zwar nicht die höchsten gefahrenen Geschwindigkeiten ($V_{85_{S2}}$) mit den geringsten gemessenen Kurvigkeiten, dafür aber umgekehrt die niedrigsten Geschwindigkeiten zu beiden Enden des Segmentes (V_{15} an MS 3 und 4) auf-

fällig gut mit den höchsten Kurvigkeitswerten (KU_{85_S2} , vgl. Bild 5.13), was auch die Erkenntnisse der vorangegangenen Untersuchungen stützt. Weitere Zusammenhänge zwischen den Werten für die Kurvigkeit und die Geschwindigkeit für diese beiden Messstellen bzw. ihrer Differenzwerte sind nicht ableitbar.

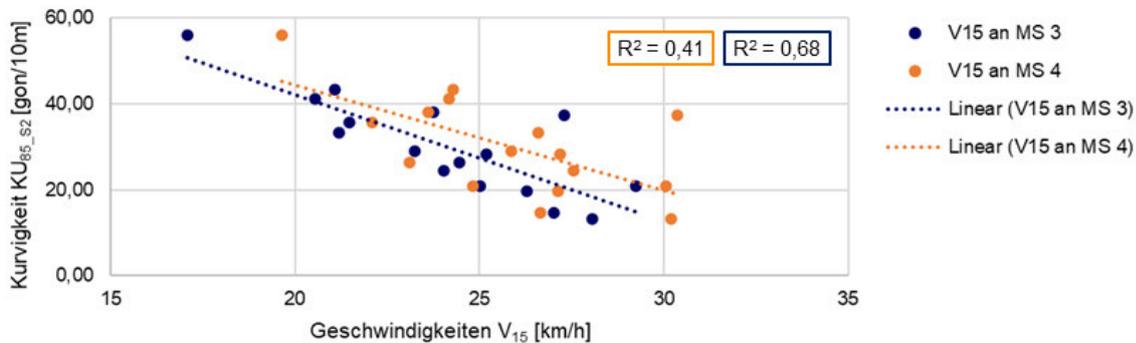


Bild 5.13: Vergleich der Geschwindigkeit V_{15} an MS 3 und 4 mit der Kurvigkeit in Segment S2

Für eine vertiefte Analyse der Fahrlinieneigenschaften auf der Kreisfahrbahn werden die Fahrlinienverläufe zunächst einem deskriptiven Vergleich unterzogen. Dabei fällt auf, dass die Geschwindigkeitsverläufe auf der Kreisfahrbahn vielfach sehr homogen sind; die Fahrlinien verlaufen vergleichsweise gebündelt und annähernd parallel (vgl. Anlage 14.9). Besondere Geschwindigkeitsänderungen, die im Kollektiv auftreten, sind nur in wenigen Fällen zu beobachten:

- An Zufahrt 116B des Kreisverkehrs (5) Pfinztal-Söllingen ist im Verlauf der Kreisverkehre durchfahrt ein stetiges, kollektives Absinken der Geschwindigkeit zu beobachten (vgl. Bild 5.14), etwas zurückhaltender kann dies auch bei Zufahrt B des Kreisverkehrs (3) Ubstadt-Weiher beobachtet werden. Diese beiden Relationen weisen die beiden höchsten KU_{200} -Werte der abstrakten Fahrlinie von 40 bzw. 41 gon/10m auf.
- Am Kreisverkehr (3) Ubstadt-Weiher wird am Kollektiv aller Fahrlinien von Zufahrt 119D erkannt, dass direkt nach der Einfahrt auf die Kreisfahrbahn und noch vor dem Wendepunkt der Fahrlinie beschleunigt wird (vgl. Bild 5.14). Die Fahrlinie weist einen niedrigen KU_{200} -Wert auf. An der anderen Zufahrt, die eine Fahrlinie mit sehr geringer Kurvigkeit aufweist ($KU_{200} = 0$; Zufahrt 116C; Kreisverkehr (5) Pfinztal-Söllingen), kann dies nicht beobachtet werden – allerdings ist dort das Geschwindigkeitsniveau durchweg höher.

Insgesamt ist das Verhalten auf der Kreisfahrbahn als homogen und unauffällig anzusehen. Kritische Einflüsse auf das Geschwindigkeitsniveau können – auch in Sonderfällen – nicht als von der Kreisfahrbahn ausgehend eingeordnet werden. Daher wird das Fahrverhalten auf der Kreisfahrbahn – mit Ausnahme der Geschwindigkeitsparameter an MS 3 und 4 für EK-Unfälle – nicht mehr vertiefend betrachtet.

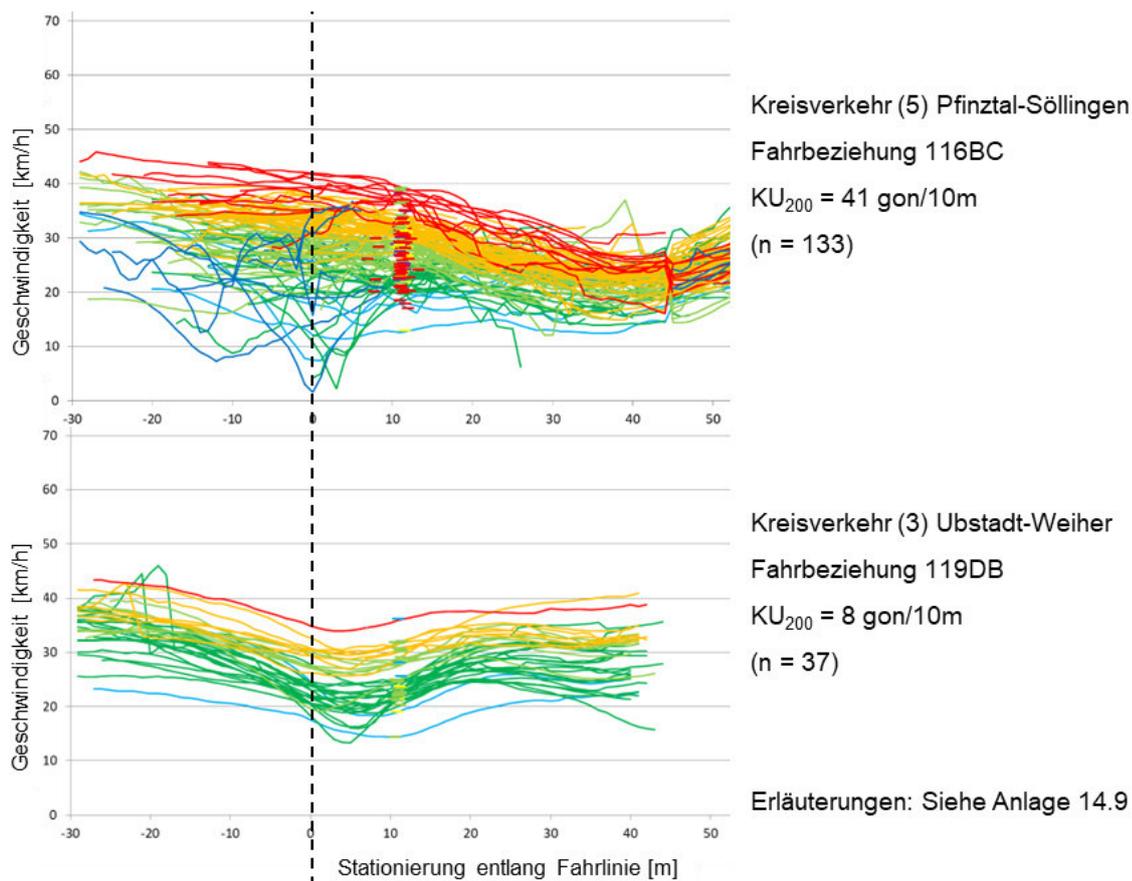


Bild 5.14: Ausgewählte Geschwindigkeitsverlaufslinien für „frei fahrende“ Fahrzeuge

5.4.5 Geschwindigkeitsverhalten und Unfälle

Bei der Analyse der UR bzw. UKR mit dem Ansatz einer linearen Regression ergibt sich, verstärkt durch das relativ kleine Kollektiv 1.4, das bereits angesprochene Problem der zahlreichen „Nullstellen“ an Zufahrten ohne Unfälle. Daher werden für die folgende Überprüfung jeweils alle Arme ohne Unfälle ausgeblendet, die Ergebnisse können durch die sehr kleinen Stichproben nur mehr als Tendenz angesehen werden. Bei gemeinsamen Betrachtungen der beiden Fahrzeuge für Unfälle des Unfalltyps 3 werden jeweils nur die kreuzenden Geradeaus-Fahrzeugströme hinzugezogen (d.h. ohne die dreiarmligen Kreisverkehre). Weiterhin wird im Regelfall die UR betrachtet, da durch das kleine Kollektiv auch hier bei einer nicht hinterfragten Verwendung von Unfallkosten bzw. UKR eine verzerrende Darstellung – die durch die wenigen Unfälle mit Personenschaden noch verstärkt würde – nicht ausgeschlossen werden kann. Daneben bieten die reinen Unfallanzahlen je Kreisverkehrsarm zu wenig Vergleichspotenzial.

Geschwindigkeitsverhalten einzelner Fahrzeuge

Gemäß der erarbeiteten Risiko-Entwurfs-Konstellation REK 3 (vgl. Kapitel 4.6.6) kann bei Unfalltyp 1 eine zu hohe *eigene* Geschwindigkeit in der Zufahrt eine maßgebliche Ursache sein. Diese These wird durch Überlagerung der Unfallraten mit den Geschwindigkeiten an den Messstellen MS 1 bis 3 gestützt: Für die UR von Fahrnfällen wird das höchste $R^2 = 0,33$ an

MS 1 festgestellt, also 10 m vor der Kreiseinfahrt. Für die folgenden Messstellen nimmt der R^2 -Wert jeweils kontinuierlich ab (vgl. Bild 5.15 rechts). Bei dieser Darstellung fällt der hohe UR-Wert der Zufahrt 116B auf ($0,22$ Unfälle / 10^6 Kfz), der von der ansonsten auch anschaulichen Linearität der Ergebnisse abweicht. Zufahrt 116B weist mit 41 gon/10m den höchsten KU_{200} -Wert aller Zufahrten in Kollektiv 1.4 auf. Wird diese Zufahrt ausgeklammert, ergeben sich deutlich bessere lineare Zusammenhänge, mit dem besten Wert bei MS 1 (vgl. Bild 5.15 links). Unter Ausklammerung dieses Wertes kann über eine Clusterung der Werte anschaulich dargelegt werden:

- Wird ca. 10 m vor der Kreiseinfahrt (MS 1) schneller als ca. 40 km/h und im Moment der Kreiseinfahrt (MS 2) schneller als ca. 35 km/h gefahren, liegen alle beobachteten $UR_{\text{Fahrnfälle}}$ über $0,12$ U/ 10^6 Kfz.
- Wird ca. 10 m vor der Kreiseinfahrt höchstens ca. 38 km/h und im Moment der Kreiseinfahrt nicht über ca. 35 km/h gefahren, liegen alle beobachteten $UR_{\text{Fahrnfälle}}$ unter $0,10$ U/ 10^6 Kfz.

Der Zusammenhang von hohen Geschwindigkeiten im Vorfeld bzw. bei der Kreiseinfahrt und hohen Unfallkennwerten von Fahrnfällen wird somit aufgezeigt.

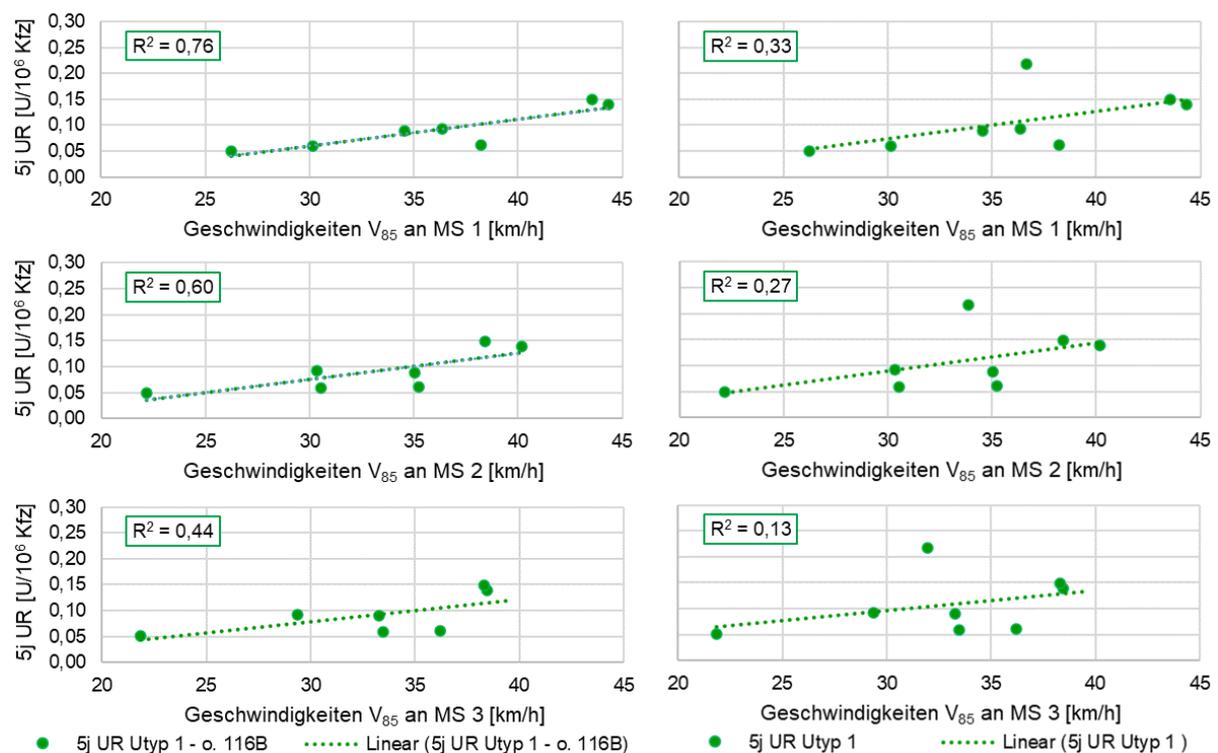


Bild 5.15: Unfallrate UR von Unfalltyp 1 über V_{85} an MS 1 bis 3

Gemäß REK 2 (vgl. Kapitel 4.6.6) können hohe Zufahrtsgeschwindigkeiten des Verursachers für EK-Unfälle ursächlich sein. Zudem besagt REK 1, dass bei EK-Unfällen eine Ursache auch in einer zu hohen Geschwindigkeit *des von links kommenden Fahrzeugs* (des potenziellen Unfallgegners) liegen kann. Für EK-Unfälle werden daher beide Beteiligungen getrennt betrachtet (jeweils nur die Geradeaus-Fahrer).

Für auf die Kreisfahrbahn zufahrende Fahrzeuge (der potenzielle Unfallbeteiligte 01) ergeben sich bei Überlagerung der Geschwindigkeit an den Messstellen MS 2 bis 4 recht hohe R^2 -Werte für einen linearen Zusammenhang mit der UR (vgl. Bild 5.16 links)⁹. Der relativ höchste R^2 -Wert im Vergleich der Messstellen liegt bei MS 3 und somit in der Nähe des potenziellen Unfallpunktes eines zufahrenden mit einem auf der Kreisfahrbahn fahrenden Fahrzeug. Weiterhin können diese Grafiken auch anschaulich anhand einer Clusterung bewertet werden:

- Wird bei der Kreiseinfahrt bzw. kurz darauf (MS 2 bzw. MS 3) schneller als ca. 33 km/h gefahren, liegen alle beobachteten $UR_{EK\text{-Unfälle}}$ über $0,25 U/10^6$ Kfz.
- Wird bei der Kreiseinfahrt bzw. kurz darauf höchstens oder langsamer als ca. 33 km/h gefahren, liegen alle beobachteten $UR_{EK\text{-Unfälle}}$ unter $0,20 U/10^6$ Kfz.

Diese Ergebnisse zeigen deutlich den Zusammenhang zwischen niedrigen Geschwindigkeiten des zufahrenden Fahrzeugs und niedrigen Unfallkennwerten für EK-Unfälle auf.

Einen weiteren interessanten Auswerteansatz bietet ein Verhältniswert zwischen V_{85} und KU_{200} -Wert: Wenn dieser Verhältniswert eher klein ist, sind anschaulich gesehen die höchsten gefahrenen Geschwindigkeiten niedrig und die zu fahrenden Kurvigkeiten hoch; mithin sind geringe Unfallkennwerte zu erwarten. Umgekehrt ist es für hohe Verhältniswerte erwartbar. Diese Erwartung bestätigt sich für die UR der EK-Unfälle (vgl. Bild 5.16 rechts).

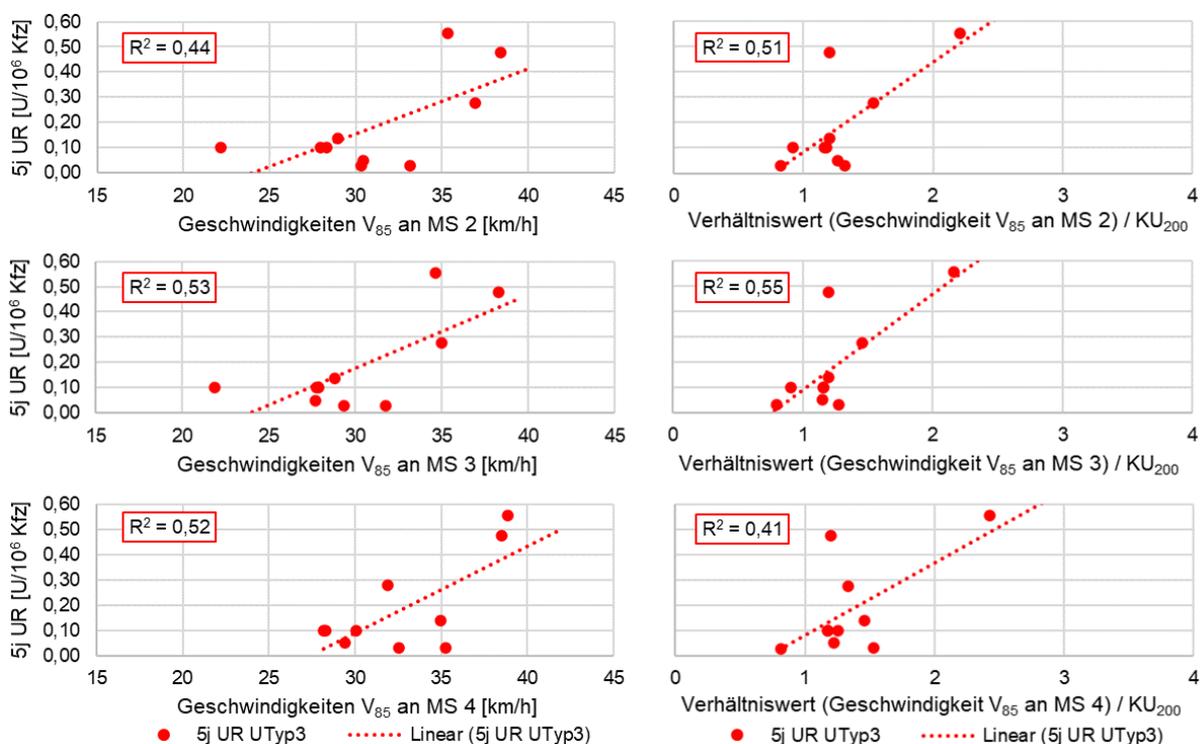


Bild 5.16: Unfallrate UR von Unfalltyp 3 über V_{85} bzw. über Verhältniswert V_{85} / KU_{200} (zufahrendes Fahrzeug)

⁹ Die Überprüfung hinsichtlich exponentieller Zusammenhänge zeigt etwas geringere R^2 -Werte, obwohl solche Zusammenhänge grundsätzlich als erwartbar angesehen werden können (ggfs. auch aufgrund der vergleichsweise geringen Werteanzahl und der erkennbaren Wertelücken im „mittleren“ Bereich)

Um die entsprechenden Zusammenhänge aus Sicht des auf der Kreisfahrbahn fahrenden Fahrzeugs (im Falle eines Unfalles wäre dies der Unfallbeteiligte 02) zu ermitteln, werden die Geschwindigkeiten der Messstellen 2 bis 4 mit den UR der folgenden Zufahrt (dort, wo sich ein EK-Unfall ereignen würde) überlagert. Entgegen der Erwartung sind hier die Zusammenhänge zwar tendenziell vorhanden, aber weniger deutlich ausgeprägt. Das höchste $R^2 = 0,20$ für V_{85} zeigt sich an MS 4 auf der Kreisfahrbahn, also (in etwa) in Höhe der folgenden Zufahrt; der Wert für MS 3 liegt knapp darunter.

Insgesamt zeigt sich ein tendenziell linear steigender Zusammenhang. Die V_{15} -Werte für MS 1 bis 3 zeigen etwas bessere Korrelationen als die jeweiligen V_{85} -Werte und somit die Tendenz auf, dass bei vergleichsweise hohen „niedrigsten gefahrenen Geschwindigkeiten“ höhere Unfallraten zu erwarten sind (vgl. Bild 5.17 links).

Über die Betrachtung der Korrelationen hinaus zeigt sich auch in diesem Fall, dass eine Cluster-Betrachtung einen grafisch anschaulichen – wenngleich auch nicht ganz eindeutigen – Zusammenhang zwischen niedrigen Geschwindigkeiten und niedrigen Unfallkennwerten aufzeigen kann (vgl. Bild 5.17 unten links):

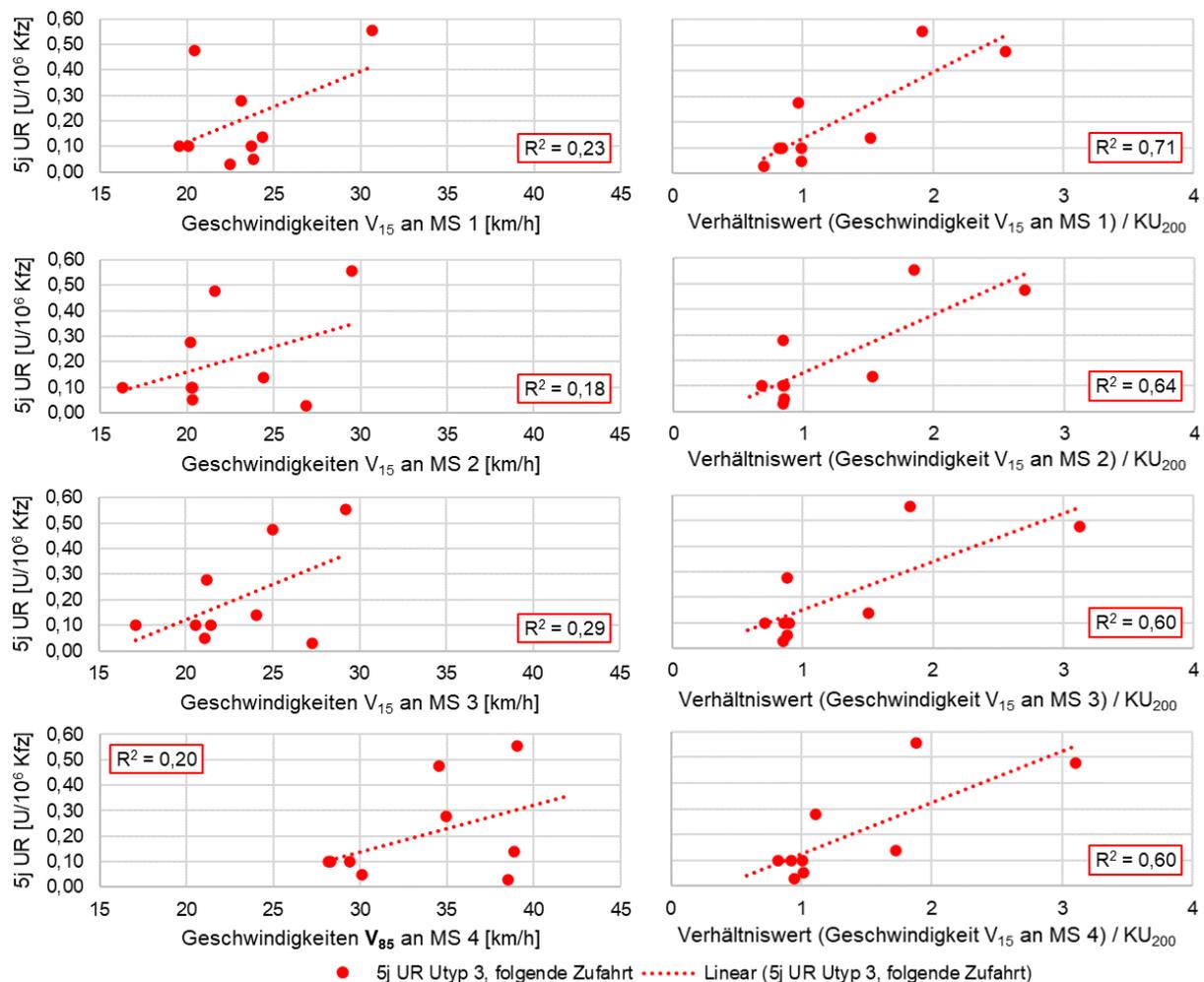


Bild 5.17: Unfallrate UR Unfalltyp 3 folgende Zufahrt über V_{15} (bzw. V_{85}) bzw. über Verhältnswert V_{15} / KU_{200}

- Wird auf der Kreisfahrbahn (MS 4) mit einer Geschwindigkeit von ca. 35 bis ca. 40 km/h gefahren, werden $UR_{EK\text{-Unfälle}}$ über $0,20 U/10^6$ Kfz beobachtet.
- Wird auf der Kreisfahrbahn (MS 4) mit einer Geschwindigkeit von 30 km/h oder weniger gefahren, liegen alle beobachteten $UR_{EK\text{-Unfälle}}$ unter $0,10 U/10^6$ Kfz.

Eine recht starke Unterstützung hierfür bietet der Verhältniswert zwischen Geschwindigkeit und KU_{200} -Wert im Vergleich zur UR: Hier wird aufgezeigt, dass bei niedrigen Verhältniswerten (die niedrigen gefahrenen Geschwindigkeiten sowie hohen zu fahrenden Gesamtkurvigkeiten entsprechen) die Unfallraten eher kleine Werte annehmen. Für steigende Werte ist sowohl für V_{85} als auch für V_{15} ein starker linearer Zusammenhang zu beobachten, wobei bei V_{15} die R^2 -Werte jeweils einige Zehntelwerte höher ausfallen (vgl. Bild 5.17 rechts). Auch dieser Zusammenhang wird anhand einer grafischen Cluster-Betrachtung ersichtlich.

Anhand von Bild 5.16 wurde gezeigt, dass das Risiko für einen EK-Unfall bei Einfahrtgeschwindigkeiten über ca. 33 km/h deutlich erhöht ist. Bereits in Kapitel 5.4.3 wurde erarbeitet, dass Einfahrtwinkel und Geschwindigkeit voneinander abhängig sind. Bild 5.18 zeigt für den Einfahrtwinkel und UR bzw. UKR sehr deutlich einen linearen Zusammenhang auf, wobei aber nur wenige auswertbare Wertepaare vorliegen. Die Regressionsgerade fällt sehr stark und zeigt in beiden Fällen für Einfahrtwinkel um 65 gon die günstigsten Werte der Unfallkenngrößen. Für Fahrurfälle konnten keine derartigen Zusammenhänge ermittelt werden.

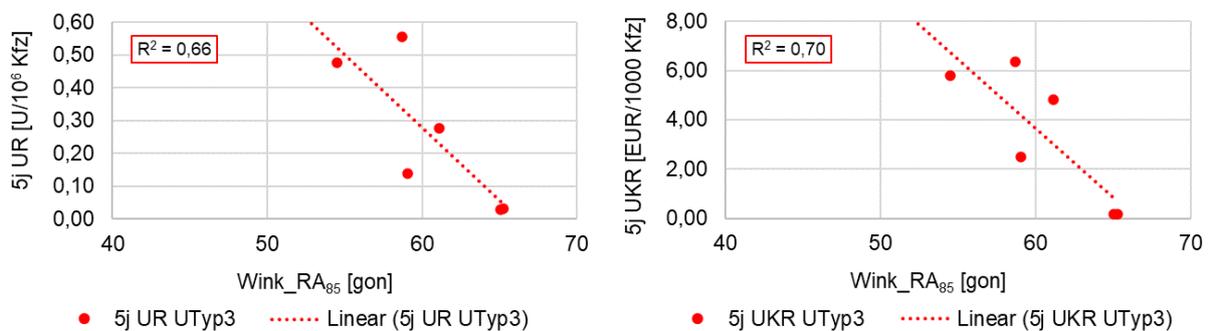


Bild 5.18: Vergleich der Einfahrtwinkel mit Unfallrate UR bzw. Unfallkostenrate UKR

Geschwindigkeitsunterschiede innerhalb einer Zufahrt und zwischen Zufahrten

Die Spannweite der Geschwindigkeitsquantile V_{15} und V_{85} ist für jede Zufahrt charakteristisch. Sie liegt je nach Zufahrt zwischen knapp 5 und 12 km/h. Interessanterweise korreliert diese Spannweite der gefahrenen bzw. fahrbaren Geschwindigkeiten sehr stark mit dem Unfallgeschehen bei EK-Unfällen sowohl für die UR als auch für die UKR (vgl. Bild 5.19).

Auch die Addition der jeweiligen Geschwindigkeitsspannweiten der beiden Relationen, die bei einem EK-Unfall beteiligt sind, ergibt eine sehr gute Korrelation zu beiden Unfallkenngrößen (vgl. Bild 5.20). Für Fahrurfälle konnten auch hier keine Korrelationen herausgearbeitet werden.

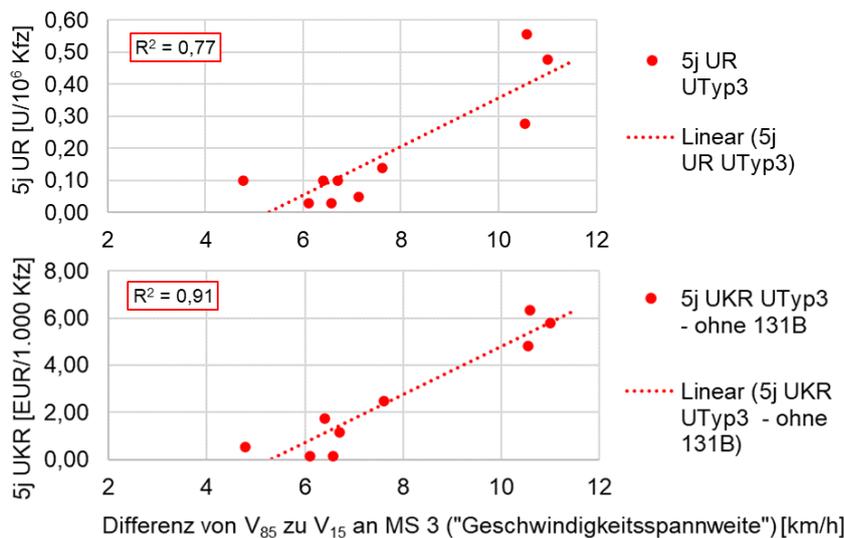


Bild 5.19: Vergleich von „Geschwindigkeitsspannweite“ mit UR bzw. UKR des Unfalltyps 3

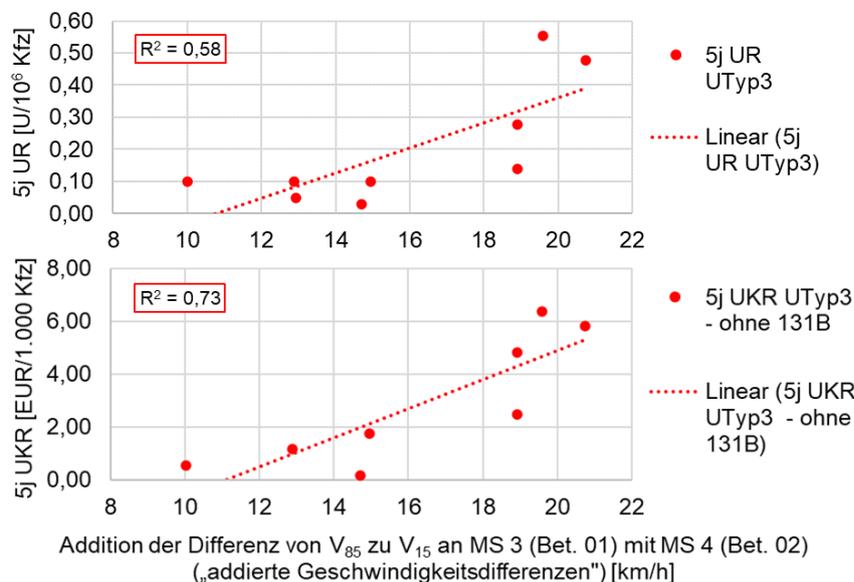


Bild 5.20: Vergleich von „addierter Geschwindigkeitsdifferenz“ mit UR und UKR des Unfalltyps 3.

Hinweis:

Bei den Betrachtungen der UKR wurde die Zufahrt 131B, die als einzige einen Unfall der Unfallkategorie 2 aufweist, nicht mit einbezogen.

Dies resultiert in einer UKR von 10,67, die im Vergleich zu den anderen UKR unverhältnismäßig groß ist und die Auswertungen verzerren würde.

Bei den Unfallraten UR ist diese Zufahrt enthalten.

Hinweis:

Bei den Betrachtungen der UKR wurde die Zufahrt 131B, die als einzige einen Unfall der Unfallkategorie 2 aufweist, nicht mit einbezogen.

Dies resultiert in einer UKR von 10,67, die im Vergleich zu den anderen UKR unverhältnismäßig groß ist und die Auswertungen verzerren würde.

Bei den Unfallraten UR ist diese Zufahrt enthalten.

5.4.6 Fazit zum Fahr- und Geschwindigkeitsverhalten

Im Einzelnen konnten die folgenden Aspekte herausgearbeitet werden:

- Das Fahr- und Geschwindigkeitsverhalten im Kreisverkehr lässt sich durch eine geeignete Führung der Fahrzeuge im Bereich der unmittelbaren Zufahrt (Segment S1-10) beeinflussen, indem die Fahrlinie dort eine eher hohe Kurvigkeit absolvieren muss. Bereits zu Beginn dieser Arbeit wurde aufgezeigt, dass gerade in diesem Bereich jedoch äußerst starke Streuungen der Entwurfsparameter vorliegen.
- Unfallkennwerte (insbesondere die UR) weisen unterschiedlich starke lineare Zusammenhänge mit dem Geschwindigkeitsverhalten auf. Einige der festgestellten linearen Zusammenhänge sind durch eher niedrige R^2 -Werte nicht stark belastbar und können insofern nur als Tendenzen angesehen werden (z.B. Bild 5.15 links, Bild 5.16 links bzw. Bild 5.17 links). Wenn Fahrverhaltensaspekte in die Betrachtung mit einbezogen werden, können

deutlich belastbarere Zusammenhänge aufgezeigt werden (z.B. Bild 5.13, Bild 5.16 rechts, Bild 5.17 rechts bzw. Bild 5.18).

- Darüber hinaus kann für alle Ergebnisse konstatiert werden, dass bei Cluster-Betrachtungen jeweils ein sehr deutlicher Zusammenhang zwischen niedrigen Geschwindigkeiten und niedrigen Unfallkennwerten sowie hohen Geschwindigkeiten und hohen Unfallkennwerten sowohl für Fahrurfälle als auch für EK-Unfälle eindrücklich aufgezeigt wird.

Das Einhalten eines vergleichsweise niedrigen Geschwindigkeitsniveaus in allen Fahrbeziehungen ist für das Fahrverhalten und für das Sicherheitsniveau eines Kreisverkehrs somit als entscheidend anzusehen. Die Wahl der Geschwindigkeit hängt von verschiedenen Aspekten des Fahrverhaltens ab – und geometrische Fahrverhaltensparameter (wie z.B. Einfahrwinkel) lassen sich nicht direkt beeinflussen. Daher wird ein zielführender Ansatz zur Verbesserung der Verkehrssicherheit an Kreisverkehren darin gesehen, durch den geometrischen Entwurf Fahrlinien zu bewirken, mit denen sich das gewünschte Geschwindigkeitsniveau indirekt bzw. „automatisch“ einstellt. Es hat sich weiterhin herausgestellt, dass es allein durch einzelne Entwurfparameter schwierig bis nicht umsetzbar ist, den Entwurf dahingehend zu steuern. Bereits im Vorfeld wurde diskutiert, wie das Zusammenspiel mehrerer Entwurfselemente steuerbar wäre. Dort wurden die Erkenntnisse zu kritischen, unfallbegünstigenden Risiko-Entwurfskonstellationen zusammengefasst, die ein Zusammenspiel von Entwurfparametern abbilden, das vermieden werden sollte (vgl. Kapitel 4.6.6). Die dortigen hypothetischen Erklärungsansätze der REK 1 und REK 2 können nunmehr als untermauert angesehen werden:

- Zufahrten, die eine tangentielle Fahrweise zulassen, führen aufgrund kleiner Einfahrwinkel zu einer schnellen Fahrweise, was höhere UR und UKR für EK-Unfälle nach sich zieht.
- Zufahrten, die schnell fahrende Fahrzeuge auf der Kreisfahrbahn zulassen, führen zu höheren UR für EK-Unfälle an der folgenden Zufahrt.

Die Erklärungshypothese zur REK 3 konnte zwar in Bezug auf die Geschwindigkeit, nicht aber auf den Krümmungswechsel und somit immerhin teilweise bestätigt werden:

- Zufahrten, in denen vor der Kreisfahrbahn schnell gefahren wird, führen zu höheren UR für Fahrurfälle.

Es stehen folglich mehrere Erkenntnisse zur Verfügung, um damit Prüfparameter für die erwarteten Abhängigkeiten zwischen Kreisverkehr und Fahrverhalten zu entwickeln.

Ziel ist, dass mit einem (oder mehreren) Prüfparameter(n) auf Grundlage eines Lageplan-Entwurfes abgeschätzt werden kann, ob mehrheitlich Fahrlinien mit dem gewünschten niedrigen Geschwindigkeitsverhalten zu erwarten sind. Damit könnte dann die „Güte“ eines Entwurfes aus sicherheitsfachlicher Sicht beurteilt werden.

5.5 Herleitung von Prüfparametern für das Geschwindigkeitsverhalten

5.5.1 Anforderungen und Ansätze

Praxistaugliche Prüfparameter für das Geschwindigkeitsverhalten an Kreisverkehren sollen folgende Anforderungen möglichst gut erfüllen:

- Mindestens ein Prüfparameter muss an regelgerecht entworfenen Kreisverkehren universell anwendbar und geeignet sein, also auch an stark unregelmäßigen, drei- oder vielarmligen Kreisverkehren. Erfahrungsgemäß können fehlende Fahrbahnteiler in untergeordneten Zufahrten kritisch sein (vor allem bei der Bestimmung der Fahrstreifenbreite der Zufahrt), was aufgrund der äußerst geringen Verkehrsstärke solcher Zufahrten für die Überprüfung von Bestandszufahrten als hinnehmbar erachtet wird (unabhängig davon sollten neue Außerortsanlagen immer in allen Armen Fahrbahnteiler erhalten). Alle weiteren Prüfparameter sollen mindestens für Geradeaus-Fahrbeziehungen universell anwendbar sein.
- Prüfparameter sollen einfach zu konstruieren bzw. resultierende Werte einfach und geeignet ablesbar sein. Konstruktionsvorschriften sollen verständlich und eindeutig sein.
- Prüfparameter sollen integriert sein, indem sie bereits bestehende Prüfanforderungen zusammenführen, auch um die Anzahl der Prüfparameter insgesamt gering zu halten.

Als Prüfparameter kommen somit in Betracht (da aufgrund der bisherigen Ergebnisse grundlegende Entwurfparameter, wie z.B. Durchmesser, ausgeschlossen werden können):

- Verhältnisgrößen: Verhältnisgrößen sind zwar einfach zu berechnen, aber insgesamt eher ungeeignet, da sie im Regelfall aus zwei grundständigen Entwurfparametern hergeleitet werden. Verhältnisgrößen aus mehreren Entwurfparametern oder untereinander in Abhängigkeit gesetzte Verhältnisgrößen neigen dazu, unübersichtlich oder schwer nachvollziehbar zu werden. Zudem besteht die Gefahr, dass andere potenziell relevante Größen unberücksichtigt bleiben.
- Konstruierte Fahrlinien: Bereits in den vorgeschalteten Auswertungen wurden konstruierte, abstrakte Fahrlinien verwendet, um das Fahrverhalten ohne Datenerhebungen nachbilden zu können. Insgesamt ist deren Konstruktion aber recht aufwändig und zudem nur für Geradeaus-Fahrbeziehungen universell einsetzbar; für eine Betrachtung aller Zufahrten wäre ein zusätzlicher Parameter erforderlich.
- Winkel: Mit Winkeln können Eigenschaften wie z.B. Öffnungsweiten, Richtungen oder Ablenkungen und somit auch Aspekte des Fahrverhaltens beschrieben werden. Als Basis für Winkel werden zwei sich schneidende Geraden benötigt, die als Verbindungen zwischen Punkten, als Tangenten oder als Kombination umgesetzt werden können. Durch ein derartiges Berühren oder Schneiden bestimmter Stellen eines Kreisverkehrs können integriert sowohl mehrere anliegende Entwurfparameter als auch Richtungen bzw.

Richtungswechsel einer Fahrbeziehung berücksichtigt werden. Zudem sind Konstruktionsanweisungen für Tangenten einfach formulier- und umsetzbar und auch die entstehenden Winkel sind unkompliziert messbar (sowohl datengestützt als auch papierbasiert).

Somit spricht einiges für Winkel als Prüfparameter, die nachfolgend als Tangentenwinkel an verschiedenen Stellen der Kreisverkehrsdurchfahrt untersucht werden sollen. Es wird als vorteilhaft erachtet, einen ersten Prüfwinkel im Bereich der Einfahrt und einen zweiten im weiteren Verlauf der Kreisdurchfahrt zu lokalisieren. Iterativ wurden verschiedene Anordnungen geprüft; die beiden erfolgversprechenden Ansätze werden hier aufgezeigt.

5.5.2 Prüfparameter im Bereich der Einfahrt (TE)

Vorüberlegungen

Der Prüfparameter im Bereich der Einfahrt soll das Fahrverhalten im Bereich des Segmentes S1-10 abbilden. Die Fahrlinien von sinngemäß geradeaus fahrenden Fahrzeugen, die möglichst geschwindigkeitsoptimiert fahren möchten, orientieren sich in diesem Bereich idealerweise am rechten Fahrbahnrand. Dabei bildet die Fahrlinie in diesem Bereich einen Rechtsbogen, der sich an die Ausrundung der Zufahrt anschmiegt. Im darauffolgenden Abschnitt der Kreisverkehrsdurchfahrt, in welchem das Fahrzeug in einem Linksbogen um die Kreisinsel herum gesteuert werden muss, orientiert sich die Fahrlinie am linken, inneren Kreisfahrbahnrand. Um geschwindigkeitsoptimiert fahren zu können, ist eine insgesamt krümmungsminimierte Fahrweise – möglichst nahe am jeweiligen Fahrbahnrand – erforderlich. Als Unterschied zum Winkel α_{CH} wurde eine stärkere Beachtung des rechten Fahrbahnrandes angestrebt.

Konstruktion

Um das Verhältnis der o.a. erforderlichen Krümmungsänderung zu beschreiben, wird ein Winkel konstruiert, der sowohl die Fahrbahnränder im Zufahrts- als auch im Kreisfahrbahnbereich berücksichtigt. Ausgehend vom Mittelpunkt der Zufahrt in 10 m Abstand zum Außenradius (Fahrbahnmitte in Höhe des „10 m-Rings“) werden zwei Tangenten konstruiert, die sich jeweils an den Ausrundungsradius der Zufahrt R_Z bzw. an die Kreisinsel anschmiegen. Der Winkel dieser beiden Tangenten wird als „Winkel der Tangenten im Bereich der Einfahrt“, kurz „**Winkel TE**“ bzw. „**TE**“ bezeichnet (vgl. Bild 5.21).

Es wird vermutet, dass sich die Fahrlinie zwischen den beiden Berührungspunkten der Tangenten mit den Fahrbahnrändern dann weniger einer „Zwischengeraden“ zwischen zwei Kreisbögen annähern kann, wenn der Winkel TE eher klein ist. Bei kleinem TE verläuft die Fahrlinie vielmehr als Wendelinie mit zuerst ab- und danach wieder zunehmender Krümmung. Gemäß dieser Vermutung wird bei relativ kleinen Winkeln TE – durch die dann zu erwartende größere

Krümmung der Fahrlinie – die Geschwindigkeit in diesen Bereichen entsprechend kleiner erwartet (und umgekehrt).

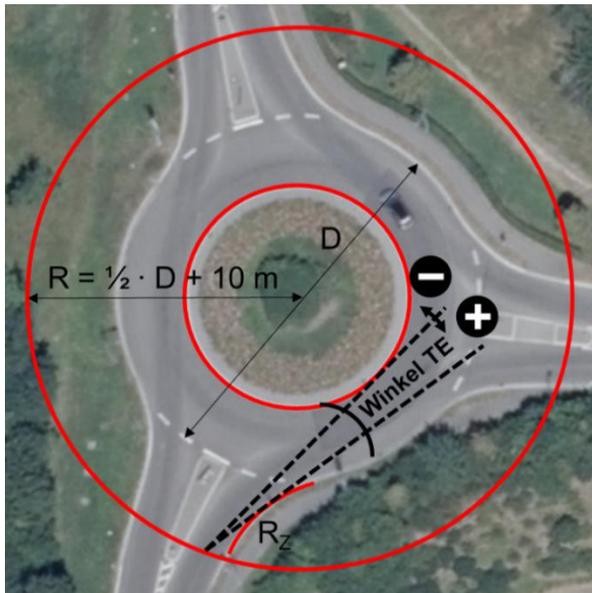


Foto-Grundlage: LUBW-Online-Kartendienst, 2019

Bild 5.21: Konstruktionsskizze für den Winkel TE mit Angabe der Vorzeichenrichtung

Test des Prüfparameters an Kollektiv 1.4

Aus einem Abgleich des Winkels TE aller Kreisverkehrsarme von Kollektiv 1.4 mit der Geschwindigkeit V_{85} an MS 1 bis 4 ergibt sich gemäß den Kriterien aus Kapitel 5.4.2 ein leichter linearer Zusammenhang, wobei der R^2 -Wert von V_{85} an MS 2 und somit im Segment S1-10 relativ am aussagekräftigsten ist (vgl. Bild 5.22). Die o.a. Vermutung, dass kleinere Winkel TE auch niedrigere Geschwindigkeiten bewirken, wird somit leicht gestützt.

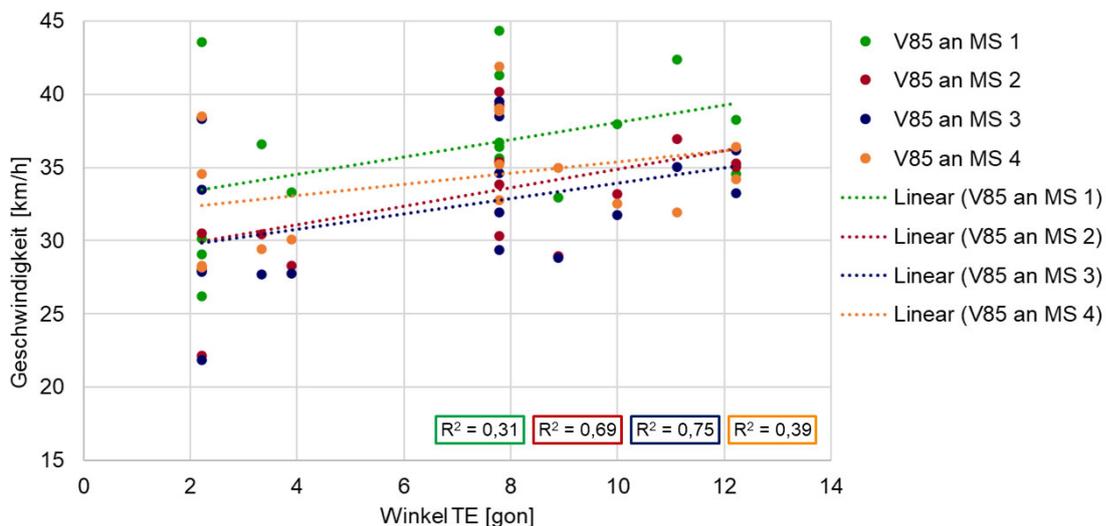


Bild 5.22: Vergleich V_{85} an MS 1 bis MS 4 mit dem Prüfparameter Winkel TE

Weitere Zusammenhänge des Prüfparameters

Der Winkel TE weist deutliche Zusammenhänge mit der Breite des Fahrbahnteilers B_{FT} auf – dies ist nicht erstaunlich, da für beide Größen wiederum lineare Zusammenhänge mit den

Geschwindigkeiten auftreten (vgl. Kapitel 5.4.2). Zusammenhänge mit dem Winkel α_{CH} hingegen sind merklich schwächer ausgeprägt. Dafür finden sich sehr starke lineare Zusammenhänge von TE zur Ablenkung A sowie (ein klein wenig schwächer, aber dennoch deutlich) auch für das Ablenkmaß A / B_Z (vgl. jeweils Bild 5.23). Hier zeigt der Winkel TE seine Bezüge nicht nur zu einer der wenigen Geometriegrößen im Bereich der Zufahrt, für die ein deutlicher Geschwindigkeitsbezug erarbeitet werden konnte (B_{FT}), sondern kombiniert diese durch starke lineare Zusammenhänge mit der Ablenkung A bzw. dem Ablenkmaß A / B_Z auch mit dem Geschwindigkeitsverhalten in den nächsten Abschnitten der Kreisverkehrsdurchfahrt. Darüber hinaus besteht über das Ablenkmaß A / B_Z ein starker Bezug zum aktuellen Regelwerk.

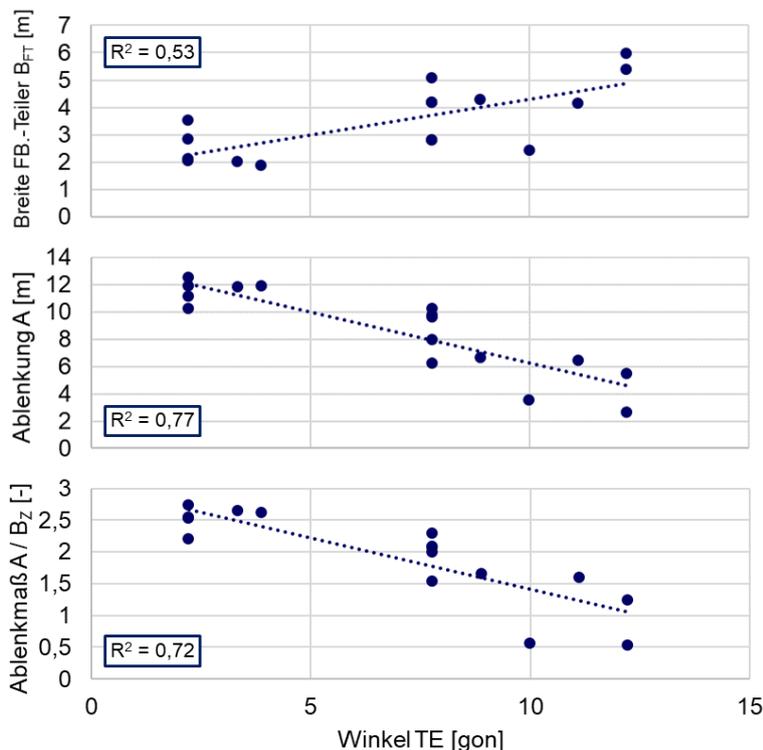


Bild 5.23: Lineare Zusammenhänge mit dem Prüfparameter Winkel TE

5.5.3 Prüfparameter im Bereich der Kreisfahrbahn (2T)

Vorüberlegungen

Der Prüfparameter im Bereich der Kreisfahrbahn (Segment S2) hat zum Ziel, die gefahrene Krümmung im Bereich der Kreisdurchfahrt (räumlich vor der folgenden Zufahrt) sowie das Geschwindigkeitsverhalten in diesem Bereich abzubilden. Ein sinngemäß geradeaus fahrendes Fahrzeug orientiert sich bei geschwindigkeitsoptimierter Fahrweise zumindest abschnittsweise am linken, inneren Fahrbahnrand und fährt einen möglichst großzügigen Linksbogen, der auch in Abhängigkeit von der Lage der Ausfahrt angepasst werden muss.

Es ist zu berücksichtigen, dass im Schweizer Regelwerk mit dem Winkel β_{CH} eine Prüfgröße enthalten ist, die Eigenschaften der Fahrlinie auf der Kreisfahrbahn auch über Tangenten abbildet. Mit dem nachfolgenden Vorgehen wurde eine Weiterentwicklung dahingehend angestrebt, sowohl die tatsächliche Kreisaustrundung R_Z , die ja bereits in den statistischen Untersuchungen in Kapitel 4.6 besonders hervorgetreten war, direkt mit zu berücksichtigen, als auch diesen Ansmiegepunkt der Tangente möglichst mittig im Segment S1-10 zu lokalisieren, da sich das Fahrverhalten dort auch auf die Kreisfahrbahn auswirkt.

Konstruktion

Um die o.a. Krümmung auf der Kreisfahrbahn zu beschreiben, wird ein Winkel benötigt, der nicht nur die Fahrbahnränder im Zufahrts- und im Kreisfahrbahnbereich berücksichtigt, sondern auch den weiteren Verlauf der Fahrlinie mit abbildet. Hierzu werden zwei Tangenten konstruiert, die sich jeweils an einem Ende an den Ausrundungsradius der Zufahrt R_Z bzw. der Ausfahrt R_A sowie in beiden Fällen an die Kreisinsel anschmiegen. Zu jeder Tangente wird eine Senkrechte am Berührungspunkt der Tangente mit der Kreisinsel konstruiert; der Schnittwinkel dieser beiden Senkrechten wird als „Winkel der beiden (2) Tangenten“, kurz „**Winkel 2T**“ bzw. „**2T**“ bezeichnet¹⁰. Der Winkel 2T erhält ein positives Vorzeichen, wenn er auf der Seite zur Kreisinsel hin konstruiert wird, ansonsten ein negatives Vorzeichen (vgl. Bild 5.24).

Ist der Winkel 2T entweder negativ oder klein, so handelt es sich um eine Kreisdurchfahrt mit sehr geringer Ablenkung; die damit verbundenen geringen Krümmungen unterstützen tendenziell erhöhte Geschwindigkeiten. Größere Winkel stehen für eine größere Ablenkung durch die Kreisinsel, wodurch sich u.a. eine längere Fahrlinie ergibt. Bei extrem großen Winkeln (mit

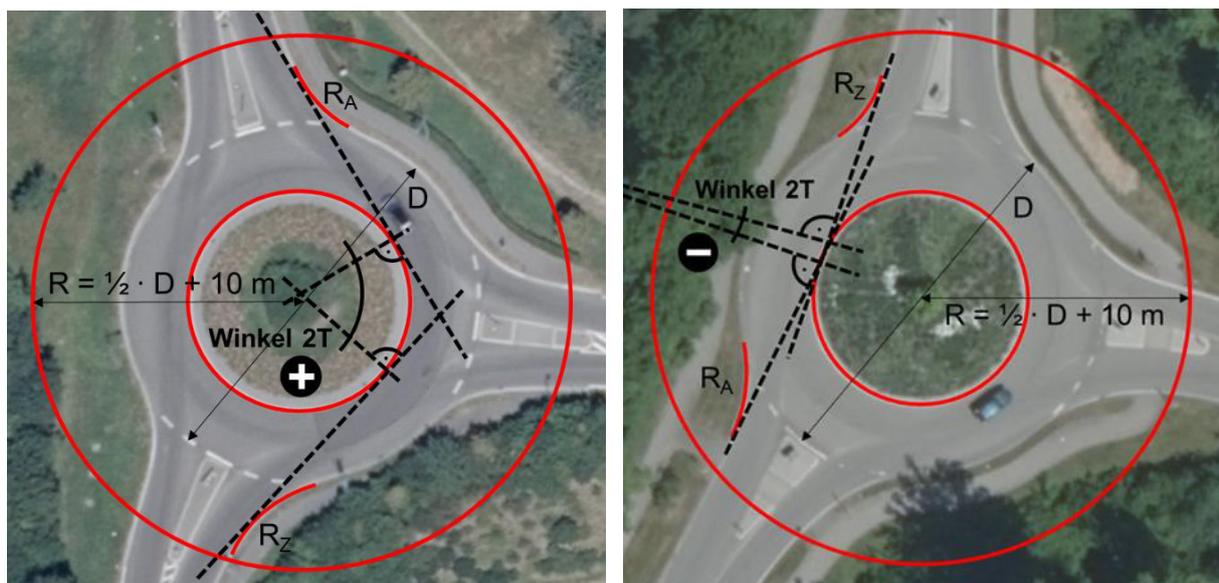


Foto-Grundlage jeweils: LUBW-Online-Kartendienst, 2019

Bild 5.24: Konstruktionsskizzen für den Winkel 2T mit positivem (links) und negativem Vorzeichen (rechts)

¹⁰ Dies ist eigentlich der Gegenwinkel des Tangentenwinkels (somit geometrisch abhängig); durch seine wertmäßig geringere Größe ist er aber besser handhabbar. Zu beachten ist, dass bei größer werdenden Tangentenwinkeln der Winkel 2T jeweils entsprechend kleiner wird und umgekehrt.

annähernd rechtwinkligen Tangenten, folglich 2T auch im Bereich um 100 gon) führt dies anschaulich dazu, dass die Fahrlinie länger wird und längere sowie ggfs. auch größere Radien aufweist. Ob durch die größeren Elementlängen ein zügigeres Fahrverhalten mit erhöhten Geschwindigkeiten gefördert wird, kann nicht ausgeschlossen werden und ist zu prüfen. Niedrige Geschwindigkeiten sind in jedem Fall für „mittlere“ Winkel 2T zu erwarten, bei denen die Ablenkung weder zu gering noch übermäßig groß ist.

Test des Prüfparameters an Kollektiv 1.4

Aus der Überlagerung des Winkels 2T mit den gemessenen Geschwindigkeiten an MS 1 bis 4 der Kreisverkehrsarme von Kollektiv 1.4 ergeben sich gemäß den Kriterien aus Kapitel 5.4.2 leichte lineare Zusammenhänge in quadratischer Form (vgl. Bild 5.25). Der relativ höchste R^2 -Wert von V_{85} beträgt 0,36 (MS 4), gefolgt von MS 3 mit 0,27. Die höchste Aussagekraft liegt – wie durch die Konstruktion des Prüfparameters beabsichtigt – im Bereich der Kreisdurchfahrt (Segment S2). Die Vermutung, dass kleinere bzw. negative Winkel 2T höhere Geschwindigkeiten bewirken und dass dies, etwas abgeschwächt, ebenfalls für sehr große Winkel 2T gilt, kann genauso bestätigt werden wie die Annahme, dass niedrigere Geschwindigkeiten am ehesten bei „mittleren“ Winkeln 2T auftreten.

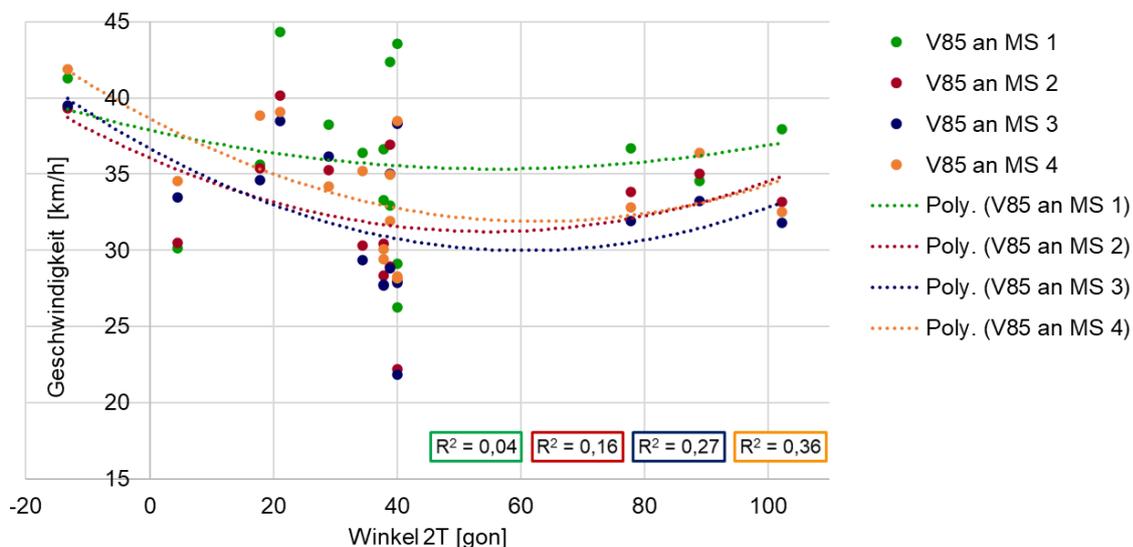


Bild 5.25: Vergleich V_{85} an MS 1 bis MS 4 mit dem Prüfparameter Winkel 2T

Weitere Zusammenhänge des Prüfparameters

Der Winkel 2T zeigt stärker als TE Bezüge zur (abstrakten) Fahrlinie, insbesondere durch seine gute Korrelation zur Kurvigkeit KU_{200} in Geradeaus-Richtung; er ist jedoch leichter zu konstruieren. Auch zum Schweizer Winkel β_{CH} zeigt sich ein sehr guter Zusammenhang, der durch die insgesamt ähnliche Konstruktionsanordnung nicht verwundert. Zusätzlich integriert der Winkel 2T aber auch den Breitenaspekt der Zufahrt und damit den sehr grundständigen Entwurfparameter B_z (vgl. jeweils Bild 5.26). Hierdurch wird auch das Erfordernis, die Zufahrt schmal zu halten, herausgestellt.

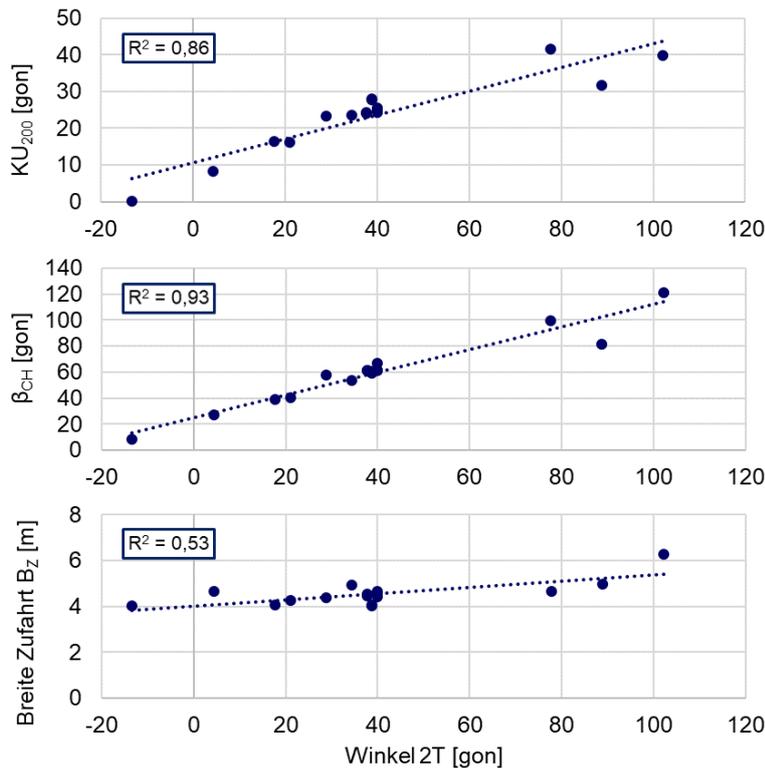


Bild 5.26: Lineare Zusammenhänge mit dem Prüfparameter Winkel 2T

5.5.4 Fazit zu den Prüfparametern

Abgleich mit den Anforderungen

Mit dem Winkel TE wurde ein Prüfparameter entwickelt und getestet, der nicht nur die eingangs formulierten Anforderungen bzgl. seiner universellen Anwendbarkeit erfüllt, sondern der auch durch gute Zusammenhänge mehrere unabhängige Entwurfsgrößen integriert abzubilden vermag. Die Bezüge zum gemessenen Geschwindigkeitsverhalten in Kollektiv 1.4 sind zwar nicht sehr stark, aber an drei Messstellen mit $R^2 > 0,15$ weiter verwendbar. Der weiterhin entwickelte Winkel 2T bietet günstigere Korrelationen zu Entwurfs- bzw. Prüfgrößen. Er ist zwar nicht an allen Zufahrten anwendbar, erfüllt aber die Konstruktionsanforderungen und liefert zum Geschwindigkeitsverhalten auf der Kreisfahrbahn leichte Korrelationen. Beide Prüfparameter sind somit für weiterführende Untersuchungen geeignet.

Weiteres Vorgehen

Für keinen der beiden Winkel TE bzw. 2T konnten direkte bzw. deutliche Zusammenhänge zu Unfallkenngrößen des Kollektivs 1.4 abgeleitet werden. Neben dem beschränkenden Einfluss durch die kleine Stichprobengröße dürfte die Hauptursache hierfür das (bereits bei der Regressionsanalyse angesprochene) Problem durch ungünstig viele „Nullstellen“ an Zufahrten ohne Unfälle liegen. Es ist also kein prinzipieller Mangel erkennbar, jedoch wird die Notwendigkeit einer Validierung der Prüfparameter TE und 2T mit einer anderen Methode an einem großen Kollektiv deutlich.

6 Bewertungshintergrund für die Prüfparameter TE und 2T

6.1 Vorgehen und Begründung

6.1.1 Vorgehen

Damit die Prüfparameter TE und 2T allgemeingültig zur Bewertung der Sicherheit von Kreisverkehren eingesetzt werden können, bedarf es eines abgesicherten Bewertungshintergrundes. Zum Erarbeiten dieses Bewertungshintergrundes wird ein zweistufiges Vorgehen angewandt:

- In einem ersten Schritt werden die bisherigen Erkenntnisse in einfache, verbale Anforderungen überführt, die die allgemeinen Beziehungen zwischen der Entwicklung des Prüfparameters und des Sicherheitsniveaus zusammenführen (vgl. jeweils die Kapitel 7.1.1, 7.2.1 und 7.3.1).
- Im zweiten Schritt erfolgt eine Validierungsuntersuchung, in wie weit die verbalen Anforderungen für die Prüfparameter TE und 2T in konkrete Maße umgesetzt werden können (vgl. jeweils die Kapitel 7.1.2, 7.2.2 sowie 7.3.2).

Im zweiten Teil von Kapitel 7 werden anschließend die Folgen der Ergebnisse und in Kapitel 8 die Auswirkungen eines möglichen Einsatzes der Prüfparameter auf den Entwurf untersucht.

6.1.2 Begründung

Bislang wurden die Prüfparameter anhand eines kleinen Teilkollektivs (Kollektiv 1.4) entwickelt. Da hierdurch Verzerrungen nicht ausgeschlossen werden können, wird in einem weiteren Schritt ein größeres Kollektiv hinzugezogen, um einen wertemäßig belastbareren Bewertungshintergrund für die Prüfparameter zu erhalten. Ziel ist ja, die Prüfparameter universell einsetzen zu können. Aus diesem Grund werden zunächst die wertemäßigen Erkenntnisse der bisherigen Untersuchungsschritte zurückgestellt. Die ermittelten *Trends* dieser Erkenntnisse werden hingegen verwendet, um verbale Anforderungen an die Prüfparameter TE und 2T zu formulieren. Diese Anforderungen sind zunächst noch möglichst allgemein gehalten, um keiner Bewertung vorzugreifen. Zudem werden sie so formuliert, dass nicht einer der Prüfparameter, sondern das Ziel der Vermeidung von Unfällen eines bestimmten Typs im Vordergrund steht.

Dieses Vorgehen wurde gewählt, da in den vorherigen Untersuchungsschritten erkannt wurde, dass für Unfälle unterschiedlichen Typs mindestens unterschiedliche, möglicherweise sogar divergierende Anforderungen an die Infrastruktur bestehen (vgl. Kapitel 4.6.6 bzw. 5.4.6). Auch werden die Anforderungen zum Vermeiden von EK-Unfällen in Bezug auf beide Unfallbeteiligten separat betrachtet, um sicherzustellen, dass spezifische Anforderungen beachtet und sich divergierende Anforderungen nicht vermischt werden.

Im Rahmen einer Validierungsuntersuchung an einem größeren Datenkollektiv (Kollektiv 1.3) werden diese Anforderungen anschließend – soweit es die Ergebnisse der Validierung zulassen – mit konkreten Werten hinterlegt, um eine bessere Belastbarkeit zu erreichen.

6.2 Methode zur Validierung als Risikountersuchung

6.2.1 Allgemeines

Eine klassische vergleichende Unfalluntersuchung ist im vorliegenden Fall durch die vielen „Nullstellen“ auf der Unfallseite (Kreisverkehrszufahrten ohne Unfälle) keine geeignete Validierungsmethode. Daher wurde eine wahrscheinlichkeitsbasierte Risikobetrachtung konzipiert, der zunächst folgende Fragestellung zugrunde liegt:

Welches Risiko besteht, dass ein Unfall eintritt, dem einerseits eine bestimmte Unfallschwere und andererseits eine Abhängigkeit von infrastrukturellen Randbedingungen bzw. Prüfparametern zugeordnet werden kann?

Die beiden Parameter „Unfallgeschehen“ und „infrastrukturelle Randbedingungen“ eignen sich durch ihre Struktur zum Bilden von Kategorien:

- Unfallgeschehen: Schadensmaßkategorie für Unfälle i
- Infrastrukturelle Randbedingungen: Prüfparameterkategorie j (in Form von Winkelkategorien für TE bzw. 2T)

Auf Grundlage einer kategorialen Datenanalyse können diese Informationen in die Wahrscheinlichkeitsuntersuchung integriert und damit gemeinsam durchgeführt werden.

6.2.2 Herleitung der Validierungsmethode

Wahrscheinlichkeitsuntersuchung

Die Grundüberlegung zur Validierungsuntersuchung lässt sich unter Zuhilfenahme der „allgemeinen Risikoformel“ (vgl. SCHNIEDER UND SCHNIEDER, 2013) als Definition des Risikos gemäß Formel (13) zusammenfassen.

$$\text{Risiko} = \text{Eintrittswahrscheinlichkeit} \cdot \text{Schadensmaß} \quad (13)$$

Die Wahrscheinlichkeit wird somit indirekt über das Risiko abgebildet. Bezogen auf die vorliegenden Unfallbetrachtungen bestimmt sich das Risiko eines Unfalls eines bestimmten Unfalltyps als Produkt der Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Unfalls mit einem zugehörigen Schadensmaß. Für die Eintrittswahrscheinlichkeit P eines Ereignisses E gilt allgemein der „Satz von Laplace“, nachdem sich „die Wahrscheinlichkeit [...] aus der relativen Häufigkeit der Elementarereignisse innerhalb eines Ereignisses“ ergibt (GOEBBELS UND RITTER, 2018). Bezogen auf allgemeine Unfallereignisse folgt Formel (14):

$$P(E) = \frac{\text{Anzahl der Unfallsituationen}}{\text{Alle betrachteten Situationen}} \quad (14)$$

Auf Basis der Kategorien aus Kapitel 6.2.1 kann die allgemeine Laplace-Formel (14) unter Einbezug des Schadensmaßes konkretisiert werden (vgl. Formel (15)):

$$P(E) = \frac{\text{Anzahl der Unfallsituationen einer Schadenskategorie sowie einer Prüfparameterkategorie}}{\text{Alle betrachteten Situationen}} \quad (15)$$

Es ist anzumerken, dass für diese Berechnungen aus mathematischer Sicht die Bedingung des Satzes von Laplace vorausgesetzt wird: Alle Ereignisse haben die gleiche Eintrittswahrscheinlichkeit. Dies wird hier für die Unfallereignisse näherungsweise angenommen, ist aber streng genommen nicht bekannt.

Kategoriale Datenanalyse

Zum Abbilden von einzelnen Häufigkeiten anhand kategorisierter Merkmale eignen sich sogenannte Kontingenztafeln (DETTE UND HÄRDLE, 2006). Die in den Kontingenztafeln dargestellten Werte h_{ij} mit den Merkmalen aus den beiden Kategorien i und j bilden jeweils den Zähler von Formel (15). Somit können auf Basis von Kontingenztafeln die Wahrscheinlichkeiten aller einzelnen Häufigkeiten in Abhängigkeit von Schadensmaß- bzw. Prüfparameterkategorien (PPK) abgeschätzt werden (vgl. Tabelle 6.1).

| Kontingenztafel | | Prüfparameterkategorien y_j | | | |
|-----------------------------|----------|-------------------------------|----------|-----|----------|
| | | y_1 | y_2 | ... | y_m |
| Schadensmaßkategorien x_i | x_1 | h_{11} | h_{12} | ... | h_{1m} |
| | x_2 | h_{21} | h_{22} | ... | h_{2m} |
| | \vdots | \vdots | \vdots | | \vdots |
| | x_k | h_{k1} | h_{k2} | ... | h_{km} |

nach DETTE UND HÄRDLE (2006)

Tabelle 6.1: Beispiel für eine zweidimensionale Kontingenztafel ($k \cdot m$ - Häufigkeitstafel)

Zur Ermittlung des Risikos werden diese Einzelwahrscheinlichkeiten entsprechend ihrer Schadenskategorie mit einem Faktor versehen, der in der allgemeinen Risikoformel (Formel (13)) das Schadensmaß symbolisiert. Durch Addition dieser faktorisierten Werte jeder Prüfparameterkategorie und anschließender Division durch die Anzahl der Gesamt-Ereignisse (Anzahl der Summanden), wird jeweils ein gewichtetes Mittel der Wahrscheinlichkeiten ausgegeben, das in der Stochastik als Erwartungswert bezeichnet wird. Der solchermaßen gewichtete Erwartungswert der verschiedenen Prüfparameterkategorien kann als internes Vergleichsmaß des Unfallrisikos der Prüfparameterkategorien herangezogen werden und wird daher als Risikokennzahl für Prüfparameterkategorie j (RIS- P_j) bezeichnet. Somit können die einzelnen

Ausprägungen der entwickelten Prüfparameter bspw. einem höheren oder niedrigeren Unfallrisiko zugeordnet werden. Auf diese Weise können sowohl bestehende als auch im Entwurf befindliche Kreisverkehrsanlagen hinsichtlich ihrer Sicherheit bewertet werden. Mathematisch lässt sich dieses Vorgehen gemäß Formel (16) beschreiben:

$$\text{RIS-P}_j = \frac{1}{n_j \cdot P(y=j)} \sum_{i=1}^k w(i) \cdot P(x=i, y=j) = \frac{1}{n_j} E \langle w(x)|y(j) \rangle \quad (16)$$

mit:

- RIS-P_j = Risikokennzahl für Prüfparameterkategorie j
- P = Wahrscheinlichkeit
- E = Erwartungswert
- n_j = Anzahl aller Ereignisse (Unfälle) in Prüfparameterkategorie j
- w = Wichtungsfaktor für die Schadenshöhe
- x_i = Schadenskategorien (1, ..., k)
- y_j = Prüfparameterkategorien (1, ..., m)

6.2.3 Durchführung der Validierungsuntersuchung

Allgemeines

Als Datenbasis dieser Betrachtungen dient das Kreisverkehrskollektiv 1.3, da es die umfangreichsten Informationen zu Entwurfs- und Unfallkenngrößen bereithält. Als Unfallkenngrößen werden die Unfallraten der Fahrunfälle (5j UR UTyp 1) sowie der EK-Unfälle (5j UR UTyp 3) an den jeweiligen Zufahrten verwendet sowie die UR der EK-Unfälle an den jeweils folgenden Zufahrten (5j UR UTyp 3, fZ). Für diese drei Unfallraten werden jeweils eigene Validierungsberechnungen mit den entwickelten Prüfparametern durchgeführt. Auch in diesem Anwendungsfall wird der Vergleichsgröße Unfallrate der Vorzug vor der Unfallkostenrate gegeben, um einzelne, schwere Unfälle nicht zu stark zu gewichten (vgl. Kapitel 4.2.3).

Datenaufbereitung zu Kontingenztafeln

Für die kategoriale Datenanalyse werden zunächst alle Eingangsgrößen (UR, Winkel TE bzw. 2T) wie folgend kategorisiert:

- a) Als Schadensmaßkategorien werden die Unfallraten in neun Kategorien eingeteilt. Die erste Kategorie umfasst dabei alle „Nullstellen“, also Kreisverkehrszufahrten ohne Unfälle (gerechnet als UR < 0,02), die folgenden sieben Kategorien sind äquidistant in 0,02er-Schritten, die letzte Kategorie beinhaltet alle Kreisverkehrszufahrten mit UR ≥ 0,16. Diese Einteilung wurde iterativ entwickelt: Im Rahmen der gewählten Kategorien Grenzen entsteht eine als sinnvoll erachtete, ausreichend große Kategorienanzahl,

ohne dabei leere oder sehr schwach besetzte Kategorien zu enthalten. Bei allen Untersuchungen ist die „Nullstellen“-Kategorie entsprechend der Anzahl der Zufahrten ohne Unfälle in den Unfalluntersuchungen deutlich am stärksten besetzt und die Besetzungsdichte der hinteren Gruppe ist analog zu den relativ seltenen schweren Unfallfolgen eher gering. Es gilt also für Formel (16) immer:

$$k = 9.$$

- b) Zum Bilden von Prüfparameterkategorien werden die aus der Kreisverkehrsanlage resultierenden Winkel in acht Kategorien gegliedert. Auch diese Einteilung basiert auf einem iterativen Prozess, um einerseits möglichst viele Kategorien als Stützpunkte für nachfolgende Regressionsbetrachtungen zu erhalten, andererseits galt es aber auch, „schwach besetzte“ oder gar leere Kategorien zu vermeiden¹¹. Dabei umfasst die erste bzw. letzte Kategorie jeweils die unteren bzw. oberen 10 % aller Werte (Quantilswerte). Diese Abgrenzung wurde getroffen, da insbesondere die Werte an den Rändern stärker streuen und somit weiter auseinanderliegen, was zu relativ weit gefassten wertemäßigen Abgrenzungen dieser Kategorien führt. Die mittleren Kategorien sind hingegen äquidistant bzgl. ihrer Grenzen zwischen dem 0,1- und dem 0,9-Quantilswert, d.h. es handelt sich hier nicht um Quantile. Es ergibt sich also für Formel (16):

$$m = 8.$$

Die Ausprägungen dieser beiden Kategorien lassen sich in zweidimensionalen Kontingenztafeln darstellen. Auf diese Weise entstehen $k \cdot m$ -Kontingenztafeln in Form von 9×8 -Matrizen für die Unfallraten-Winkel-Betrachtungen auf der Basis von Tabelle 6.1.

Aufstellen der einzelnen gewichteten Wahrscheinlichkeiten

Im nächsten Schritt werden die Werte der Kontingenztafeln zu wahrscheinlichkeitsbasierten Risiken umgerechnet, indem die einzelnen Werte jeweils durch die Gesamtheit aller Unfälle n geteilt werden (vgl. Tabelle 6.2). Als Wichtungsfaktor für die Schadenshöhe wird für w_2 bis $w_{(k-1)}$ jeweils die Mitte der jeweiligen Schadensmaßkategorie angesetzt und aus Übersichtlichkeitsgründen mit zehn multipliziert, bspw. gilt $w_2 = 0,3$ für die Kategorie mit den Grenzen $[0,02; 0,04)$. Angepasst an dieses Vorgehen wird für die höchste Schadensmaßkategorie für den Bereich $[0,16; \infty)$ der Wichtungsfaktor $w_9 = 1,7$ verwendet. Weiterhin gilt $w_1 = 0$, da in dieser Schadensmaßkategorie alle unfallfreien Situationen enthalten sind.

¹¹ Prinzipiell wären bei der angewandten Methode schwach besetzte Kategorien kein Problem, sofern diese nicht (fast) ausschließlich Nullstellen bei der UR-Kategorisierung aufweisen. Durch ausreichend besetzte Kategorien tritt dieses Problem nicht auf.

| Wahrscheinlichkeiten | | Prüfparameterkategorien y_j | | | | Wichtungsfaktor w_i |
|-----------------------------|----------|-------------------------------|------------|-----|------------|-----------------------|
| | | y_1 | y_2 | ... | y_m | |
| Schadensmaßkategorien x_i | x_1 | h_{11}/n | h_{12}/n | ... | h_{1m}/n | $w_1 = 0,0$ |
| | x_2 | h_{21}/n | h_{22}/n | ... | h_{2m}/n | $w_2 = 0,3$ |
| | \vdots | \vdots | \vdots | | \vdots | \vdots |
| | x_k | h_{k1}/n | h_{k2}/n | ... | h_{km}/n | $w_k = 1,7$ |

Tabelle 6.2: Gewichtete Wahrscheinlichkeiten auf Basis der Kontingenztafel

Berechnung und Analyse der Risikokennzahl RIS-P

In jeder Spalte y_j (y_1 bis y_m) der Prüfparameterkategorien werden die gewichteten Wahrscheinlichkeiten summiert und durch die in dieser Spalte betrachteten Ereignisse n_j dividiert. Dieser Schritt ist allgemein für jede Prüfparameterkategorie in Formel (17) dargestellt.

$$RIS - P_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^k \left(\frac{h_{ij}}{n} \cdot w_i \right) \quad (17)$$

mit:

- RIS- P_j = Risikokennzahl für Prüfparameterkategorie j
- n = Anzahl aller Ereignisse (Unfälle)
- n_j = Anzahl aller Ereignisse (Unfälle) in Prüfparameterkategorie j
- h_{ij} = Einzelner Häufigkeitswert der Kontingenztafel
- w_i = zugehöriger Wichtungsfaktor für die Schadenshöhe

Somit steht für jede Prüfparameterkategorie eine Risikokennzahl RIS- P_j zur Verfügung. Hohe Werte für RIS- P_j bedeuten eine größere Neigung dieser Prüfparameterausprägungen zu Unfällen, niedrigere Werte entsprechen kleineren Neigungen. Die Werte für RIS- P_j können nun für jede Prüfparameterkategorie in Diagrammen aufgetragen und ihre Entwicklung in Abhängigkeit von der Ausprägung der Prüfparameter bewertet werden.

In Anlage 14.13 finden sich die Nachweise zur Berechnung der jeweiligen Risikokennzahlen RIS-P für alle vorgenommenen Überprüfungen.

7 Aufstellen und Überprüfen von Anforderungen an die Prüfparameter

7.1 Vermeiden von Fahrurfällen

7.1.1 Anforderungen zum Vermeiden von Fahrurfällen

Im Rahmen der regressionsbasierten Voruntersuchungen wurde bereits erkannt, dass zwischen der Ablenkung A sowie den Unfallraten des Unfalltyps 1 ein positiv linearer Zusammenhang besteht (vgl. Kapitel 4.6.5). Wird diese Erkenntnis mit dem ebenfalls linearen, aber negativen Zusammenhang zwischen A und TE (vgl. Bild 5.23, zweites Schaubild) zusammengeführt, lässt sich ein negativ linearer Zusammenhang zwischen Unfällen des Typs 1 und dem Prüfparameter TE ableiten: Mit zunehmendem TE verringert sich das Unfallgeschehen von Fahrurfällen. Da für Fahrurfälle i.d.R. ein Auffahren auf Fahrbahnteiler oder die Kreisinsel charakteristisch ist (vgl. Kapitel 4.4.3), wird durch ein ausreichend großes TE sichergestellt, dass der Fahrer durch die Führung im Bereich der Zufahrt offensichtlich besser auf die Kreisfahrbahn und um die Kreisinsel geleitet wird.

Es findet sich ein weiterer Befund zu Fahrurfällen: Die Geschwindigkeiten stehen allgemein in einem sehr starken Zusammenhang mit der Kurvigkeit der Fahrlinie im Segment S1-10 vor der Einfahrt (vgl. Kapitel 5.4.3). Dabei beschreiben langsamere Fahrzeuge (V_{15}) Fahrlinien mit höheren Kurvigkeiten als schnellere Fahrzeuge (V_{85}), d.h. sie haben eine weniger optimierte Fahrlinie und bewältigen auf dem kurzen Abschnitt vor der Einfahrt auf kurzer Fahrlänge eine vergleichsweise große Richtungsänderung. Ist es – nicht zuletzt durch die bauliche Gestaltung der Zufahrt – möglich, dass diese Richtungsänderung auf einen längeren Fahrlinienabschnitt verteilt werden kann und somit ein geringerer Anteil der Richtungsänderung auf dem Abschnitt unmittelbar vor der Einfahrt absolviert werden muss, dann fahren diese Fahrzeuge insgesamt auch schneller.

Zu den Geschwindigkeiten an den Messstellen MS 1 bzw. MS 2 konnte ein positiv linearer Zusammenhang zwischen der jeweils gefahrenen Geschwindigkeit und dem Prüfparameter TE festgestellt werden (vgl. Bild 5.22). Die niedrigsten Geschwindigkeitswerte können demnach bei eher „kleinen“ Winkeln TE beobachtet werden, wenn – anschaulich formuliert – die dem Fahrer dargebotene „Öffnung“ der Kreisverkehrsanlage zwischen den beiden Tangenten während der Zufahrt eher „schmal“ ist. Für den Winkel TE lassen sich lineare Zusammenhänge mit dem Ablenkmaß A aufzeigen (vgl. Bild 5.23). Auch wenn ein solcher Nachweis nicht möglich ist, so wird vermutet, dass bei zunehmender Ablenkung – sofern diese auf die gleiche Streckenlänge bezogen wird (dieser Bezug ist mit den vorliegenden Daten nicht herstellbar) – die Geschwindigkeiten naheliegenderweise auch eher niedriger ausfallen dürften. Zudem konnten für Fahrurfälle anhand von Kollektiv 1.4 Zusammenhänge zwischen Unfallraten und

der Geschwindigkeit V_{85} an den Messstellen MS 1 bzw. MS 2 herausgearbeitet werden – sowohl mittels einer Cluster-Analyse als auch über eine lineare Betrachtung (vgl. Bild 5.15). Hohe fahrbare Geschwindigkeiten begünstigen demnach das Auftreten vergleichsweise höherer Unfallraten vom Unfalltyp 1, ziehen diese aber nicht zwingend nach sich.

Zu beachten ist, dass die Aussagen zum Unfallgeschehen nur auf dem sehr kleinen Kollektiv 1.4 basieren und dass dort für $TE < \text{ca. } 2,0 \text{ gon}$ keine Messungen vorliegen. Im Rahmen der Validierung werden aber sehr kleine oder negative Werte von TE ebenfalls mit betrachtet.

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Je größer der Winkel TE ist, desto eher verringert sich die Neigung zu Fahrunfällen an dieser Zufahrt. Wird TE jedoch zu groß, begünstigt dies eine vergleichsweise zügige Zu- und Einfahrt in den Kreisverkehr. Dies kann das Unfallgeschehen für Fahrunfälle durch insgesamt zu hohe Geschwindigkeiten wiederum begünstigen und dann auch schwere Unfallfolgen nach sich ziehen.

Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse lauten die zu prüfenden Anforderungen an den Prüfparameter TE zur Vermeidung von Fahrunfällen:

- 1) TE soll nicht zu klein sein, um den Fahrer nicht zu radial zu führen und um ihn gut auf die Einfahrt auf die Kreisfahrbahn vorzubereiten.
- 2) TE soll nicht zu groß sein, um den Fahrer nicht zu tangential zu führen und um ihn nicht schon im Vorfeld zu einer zu zügigen Fahrweise zu verleiten.

7.1.2 Überprüfen der Anforderungen

Zur Überprüfung der Anforderungen 1) und 2) wurden Risikokennzahlen für das folgende Kategorienpaar gebildet:

5j UR UTyp 1 / Winkel TE

Für jede Prüfparameterkategorie (PPK) des Winkes TE ergibt sich eine Risikokennzahl. Die in Bild 7.1 dargestellte lineare Regressionsgerade zeigt, dass das Risiko für einen Fahrunfall bei sehr kleinem Winkel TE eher hoch ist und für steigende Winkel TE abnimmt. Ein wieder zunehmendes Risiko für große bzw. sehr große Winkel TE kann nicht abgeleitet werden. Insgesamt bewegt sich die Höhe von RIS-P eher im unteren Bereich (max. Wert $< 0,0025$). Die Grenzen der PPK zeigt Tabelle 7.1.

In Bezug zu konkreten Maßen ist zu erwähnen, dass nur drei Kreisverkehrszufahrten einen negativen Winkel TE aufweisen (die Kreisinsel liegt also aus Sicht der Zufahrt links versetzt, oder sie ist sehr klein bzw. die Kreisfahrbahn sehr breit, vgl. auch Definition nach Bild 5.21). Diese drei Zufahrten sind mit Unfällen vom Unfalltyp 1 belastet. Als Folge dieser Betrachtungen ist von negativen Winkeln TE in jedem Fall abzuraten.

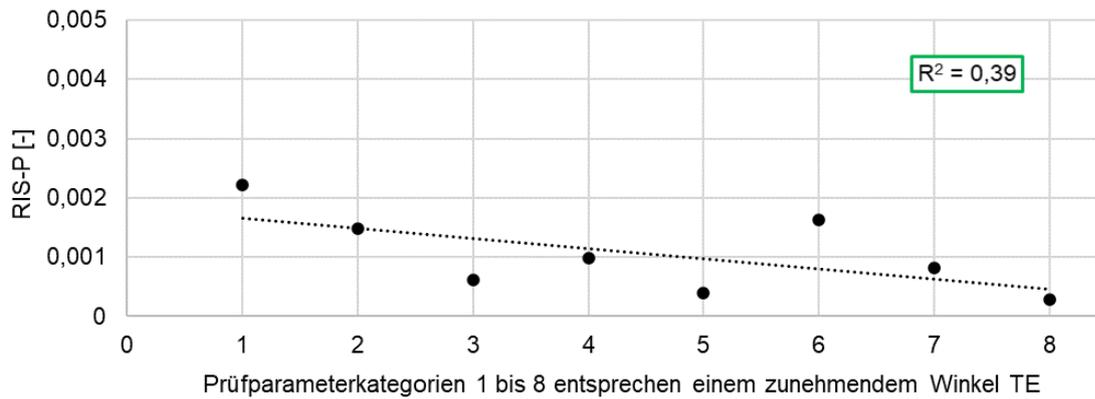


Bild 7.1: Risikokennzahrentwicklung für Winkel TE bei 5j UR Utyp 1

| | PPK 1 | PPK 2 | PPK 3 | PPK 4 | PPK 5 | PPK 6 | PPK 7 | PPK 8 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Grenzen der PPK [gon] | < 1,24 | < 2,93 | < 4,63 | < 6,33 | < 8,03 | < 9,73 | < 11,4 | ≥ 11,4 |

Tabelle 7.1: Grenzen der Prüfparameterkategorien bei der Überprüfung der Anforderungen 1) und 2)

Fazit zu Anforderung 1): Die Anforderung 1) wird bestätigt.

Fazit zu Anforderung 2): Die Anforderung 2) wird nicht bestätigt.

Für Fahrurfälle kann dementsprechend konstatiert werden, dass geringe und vor allem negative Werte für TE ungünstig sind, für mittlere und größere Werte kann für TE jedoch kein negativer Einfluss auf das Aufkommen von Fahrurfällen festgestellt werden.

7.2 Vermeiden von EK-Unfällen – Beitrag des Unfallverursachers

7.2.1 Anforderungen zu EK-Unfällen – Beitrag des Unfallverursachers

Bei der ersten Regressionsanalyse wurde in Bezug auf den Parameter R_z (Ausrundungsradius in der Zufahrt) herausgearbeitet, dass für zufahrende Fahrzeuge möglicherweise die „Tangentialität“ der Führung in Zusammenhang mit dem Unfallgeschehen bei EK-Unfällen steht (vgl. Kapitel 4.6.5). Die Fahrlinienuntersuchungen am Kollektiv 1.4 brachten die Erkenntnis, dass nur diejenigen Entwurfsgrößen des Kreisverkehrs einen Einfluss auf die Geschwindigkeit ausüben, die auch diese „Tangentialität“ abbilden (vgl. Kapitel 5.4.2). Für zufahrende Fahrzeuge konnte ein linear steigender Zusammenhang zwischen der UR und der Geschwindigkeit des zufahrenden Fahrzeugs ermittelt werden (vgl. Bild 5.16), in der Cluster-Betrachtung zudem eine Anfälligkeit für EK-Unfälle mit hohen UR bei hohen Einfahr-Geschwindigkeiten. Da die Geschwindigkeiten einen starken Zusammenhang mit der Kurvigkeit der Fahrlinie im Segment S1-10 vor der Einfahrt aufweisen (vgl. Kapitel 5.4.3), der durch den Winkel TE abgebildet werden kann, scheint es auch hier angebracht, Anforderungen an die Prüfgröße TE zu stellen.

Als Fazit dieser Gegenüberstellungen ergeben sich zur Vermeidung von EK-Unfällen die folgenden, zu prüfenden Anforderungen an die Prüfparameter aus Sicht der Zufahrt:

- 3) Der Winkel TE soll möglichst klein sein, damit der Fahrer die Situation auch als verkehrsrechtliche „Einbiege-Situation“ wahrnimmt.
- 4) Der Winkel 2T soll „mittlere Werte“ annehmen. Zum einen soll der zufahrende Fahrer die Einmündungssituation gut erkennen und entsprechend reagieren können, zum anderen soll er nach der Einfahrt auf die Kreisfahrbahn weder einem übermäßig starken Lenkerfordernis ausgesetzt, noch durch einen Durchschuss-Effekt zu Beschleunigungen verleitet werden.

7.2.2 Überprüfen der Anforderungen

Die Anforderungen aus Sicht der Einfahrt beziehen sich auf beide Prüfparameter, wodurch eine zweigeteilte Überprüfung erforderlich wird. Zunächst wird Anforderung 3) überprüft, indem für das folgende Kategorienpaar die Risikokennzahlen gebildet wurden:

5j UR UTyp 3 / Winkel TE

Die in Bild 7.2. dargestellte lineare Regression zwischen Risikokennzahlen und Prüfparameterkategorien zeigt, dass das Risiko für einen EK-Unfall bei sehr kleinem Winkel TE niedrig ist und für steigende Winkel TE zunimmt. Der R^2 -Wert ist mit 0,21 zwar nur knapp über dem selbstgewählten Mindestwert von 0,15, allerdings ist der insgesamt ansteigende Trend der Werte erkennbar. Die Höhe der RIS-P-Werte liegt noch in einem eher unteren Bereich (max. Wert < 0,003). Die Grenzen der Prüfparameterkategorien zeigt Tabelle 7.2.

Fazit zu Anforderung 3): Die Anforderung 3) wird bestätigt.

Damit wird aufgezeigt, dass EK-Unfälle begünstigt werden, je größer die Werte für den Winkel TE sind.

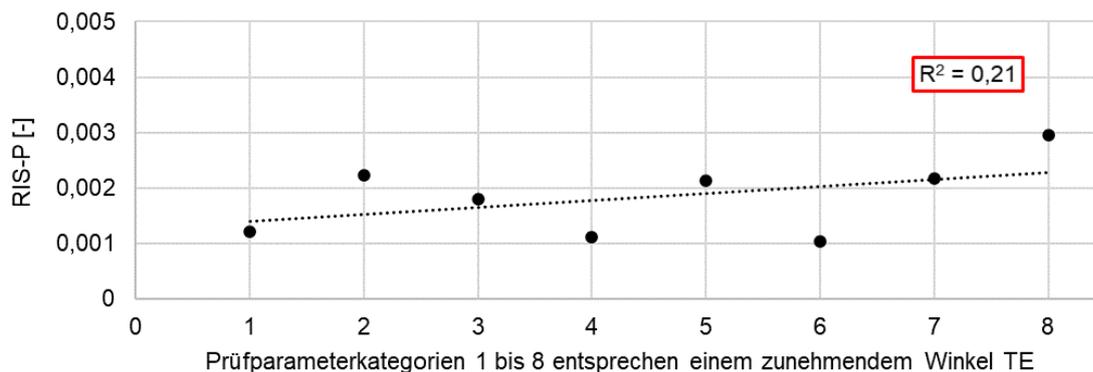


Bild 7.2: Risikokennzahrentwicklung für Winkel TE bei 5j UR Utyp 3

| | PPK 1 | PPK 2 | PPK 3 | PPK 4 | PPK 5 | PPK 6 | PPK 7 | PPK 8 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Grenzen der PPK [gon] | < 1,24 | < 2,93 | < 4,63 | < 6,33 | < 8,03 | < 9,73 | < 11,4 | ≥ 11,4 |

Tabelle 7.2: Grenzen der Prüfparameterkategorien bei der Überprüfung der Anforderung 3)

Die Risikokennzahlen für die Überprüfung von Anforderung 4), welche sich auf den Prüfparameter Winkel 2T bezieht, wurden anhand des folgenden Kategorienpaars gebildet:

5j UR UTyp 3 / Winkel 2T

Bild 7.3 zeigt die Entwicklung der Risikokennzahlen RIS-P. Die Regressionsgerade verdeutlicht, dass das Risiko für einen EK-Unfall bei sehr kleinem Winkel 2T relativ am höchsten ist und für größer werdende Winkel 2T abnimmt. Kategorie 8 umfasst relativ gesehen die größten Winkel dieses Untersuchungsschritts – dazu ist anzumerken, dass die Kategorieuntergrenze bei rund 45 gon liegt (vgl. Tabelle 7.3). Die Anforderung bezieht sich somit auf „mittlere Winkel“, die entsprechend den zuvor durchgeführten Überlegungen angenähert im Bereich von ca. 50 bis 60 gon vermutet wurden (vgl. Kapitel 5.5.3, insbesondere Bild 5.25); somit liegt Kategorie 8 im Bereich dieser „mittleren Winkel“. Gesonderte Betrachtungen für noch größere Winkel fehlen allerdings. Die Güte der Regression ist mit $R^2 = 0,64$ ausgesprochen gut. Die Höhe der RIS-P-Werte liegt mit unter 0,003 noch im unteren Bereich. Tabelle 7.3. zeigt die Grenzen der PPK für Winkel 2T.

Fazit zu Anforderung 4): Die Anforderung 4) wird bestätigt (unter Vorbehalt für sehr große Winkel 2T).

Die Überprüfung hat gezeigt, dass das Risiko für EK-Unfälle umso niedriger ist, je größer der Winkel 2T wird, zumindest bis in einen Bereich von etwa 45 gon.

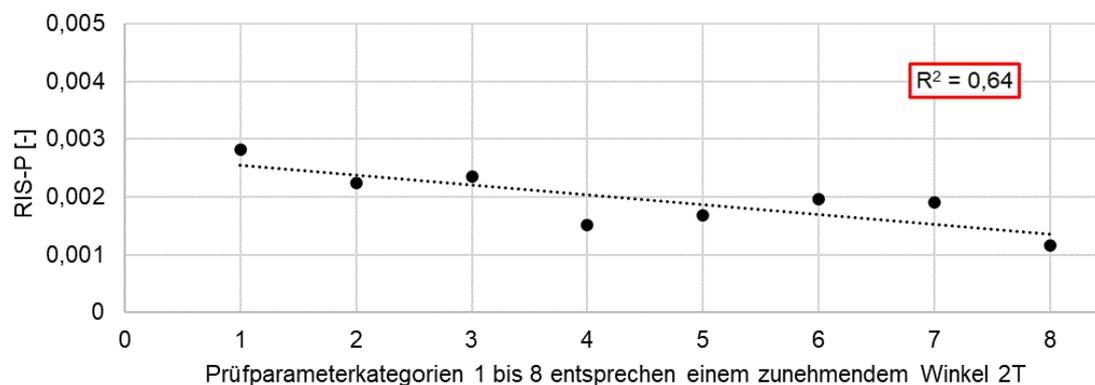


Bild 7.3: Risikokennzahrentwicklung für Winkel 2T bei 5j UR Utyp 3

| | PPK 1 | PPK 2 | PPK 3 | PPK 4 | PPK 5 | PPK 6 | PPK 7 | PPK 8 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Grenzen der PPK [gon] | < 11,8 | < 17,2 | < 22,7 | < 28,2 | < 33,6 | < 39,1 | < 44,6 | ≥ 44,6 |

Tabelle 7.3: Grenzen der Prüfparameterkategorien bei der Überprüfung der Anforderung 4)

7.3 Vermeiden von EK-Unfällen – Beitrag des Unfallbeteiligten 02

7.3.1 Anforderungen zu EK-Unfällen – Beitrag des Unfallbeteiligten 02

Schon in der ersten Regressionsanalyse zeigten sich anhand von $KU_{200,Arm\ links}$ deutliche Indizien, dass bei EK-Unfällen nicht nur die Perspektive des Unfallverursachers (Fahrzeug 01) aus der Zufahrt, sondern auch die des Unfallbeteiligten bzw. -gegners (Fahrzeug 02) zu betrachten ist (vgl. Kapitel 4.6.5). In einem ersten Schritt wurden insbesondere hohe Geschwindigkeiten an MS 4 als auffällig identifiziert (vgl. Kapitel 5.4.5). Für die Messstellen MS 3 und MS 4 auf der Kreisfahrbahn wurden quadratische Zusammenhänge zwischen der Geschwindigkeit und dem Winkel 2T festgestellt (vgl. Bild 5.25). Dabei fallen die Regressionskurven zunächst mit zunehmendem Winkel 2T, erreichen im Bereich von ca. 40 bis 70 gon für V_{85} an den Messstellen jeweils ein Minimum und steigen anschließend wieder an. Die Zusammenhänge zwischen der UR an der folgenden Zufahrt und der Geschwindigkeit an MS 3 und MS 4 sind zwar erkennbar, aber eher schwach belastbar (vgl. Bild 5.17).

Daraus lässt sich die Folgerung ableiten, dass die V_{85} auf der Kreisfahrbahn nicht zu hoch sein soll. Dies wird erreicht, indem der Winkel 2T auf „mittlere“ Werte begrenzt wird, die dem Minimum der Regressionskurven entsprechen.

Zum Vermeiden von EK-Unfällen aus Sicht der Kreisfahrbahn wird die folgende, zu prüfende Anforderung an den Prüfparameter 2T aufgestellt:

- 5) Der Winkel 2T soll „mittlere Werte“ annehmen. Der Fahrer soll nach der Einfahrt auf die Kreisfahrbahn weder einem übermäßig starken Lenkerfordernis ausgesetzt noch durch einen Durchschuss-Effekt zu Beschleunigungen verleitet werden. Auf der Kreisfahrbahn soll ein mittleres, homogenes Geschwindigkeitsniveau entstehen.

7.3.2 Überprüfen der Anforderungen

Für diese Überprüfung wird für das folgende Kategorienpaar die Risikokennzahlen gebildet:

5j UR UTyp 3_{folgende Zufahrt} / Winkel 2T

Die lineare Regressionsgerade in Bild 7.4 zeigt, dass das Risiko für einen EK-Unfall aus Sicht des Verkehrsteilnehmers auf der Kreisfahrbahn bei sehr kleinem Winkel 2T relativ am höchsten ist und für größere Winkel 2T abnimmt. Es ist auch hier zu erwähnen, dass Kategorie 8 die o.a. „mittleren Winkel“ (vgl. 7.2.2) – hier mit Werten von mind. 43,7 gon – enthält (vgl. Tabelle 7.4); demnach fehlen ebenfalls Betrachtungen für größere Winkel. Die Überprüfung der Anforderung 5) lässt zudem ein deutlich wertemäßiges Absinken von RIS-P erkennen, je eher der Winkel 2T „mittlere“ Werte annimmt.

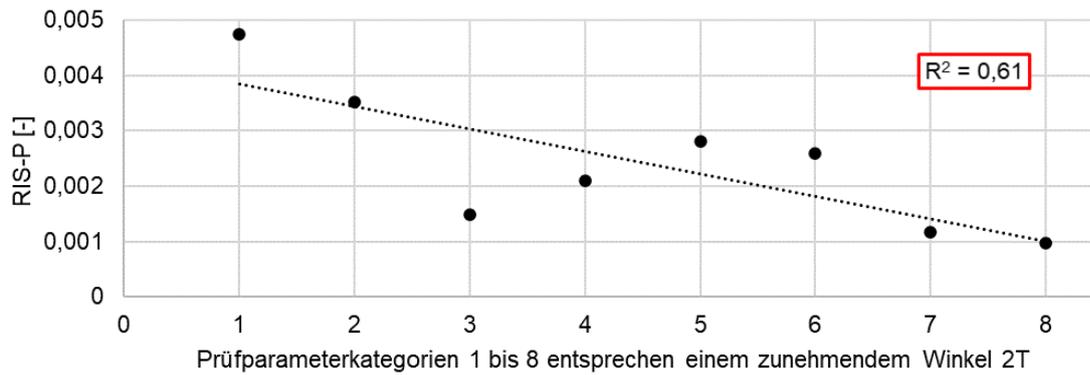


Bild 7.4: Risikokennzahrentwicklung für Winkel 2T bei 5j UR Utyp 3folgende Zufahrt

| | PPK 1 | PPK 2 | PPK 3 | PPK 4 | PPK 5 | PPK 6 | PPK 7 | PPK 8 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Grenzen der PPK [gon] | < 17,1 | < 21,5 | < 26,0 | < 30,4 | < 34,8 | < 39,3 | < 43,7 | ≥ 43,7 |

Tabelle 7.4: Grenzen der Prüfparameterkategorien bei der Überprüfung der Anforderung 5)

Die Höhe des R^2 -Wertes zeugt mit 0,61 auch in diesem Fall von einer hohen Güte der linearen Regression. Die Höhe der RIS-P-Werte liegt hier – im Gegensatz zu allen anderen Auswertungen – mit bis zu 0,005 fast doppelt so hoch. Zudem ist die negative Steigung der Regressionsgeraden deutlich ausgeprägt. Die Einhaltung dieser Anforderung ist also mit den relativ höchsten Sicherheitsgewinnen verbunden. Tabelle 7.4 zeigt die Grenzen der Prüfparameterkategorien für Winkel 2T.

Fazit zu Anforderung 5): Die Anforderung 5) wird bestätigt (unter Vorbehalt für sehr große Winkel 2T).

Das Ergebnis zeigt, dass das Risiko für EK-Unfälle umso niedriger ist, je größer der Winkel 2T wird, zumindest bis in einen Bereich von etwa 45 gon.

7.4 Diskussion der Ergebnisse

7.4.1 Überblick

Als Ergebnis der Validierungsuntersuchung stehen zwei vollumfänglich und zwei unter Vorbehalt bestätigte Anforderungen zur Verfügung, während Anforderung 2) nicht bestätigt wurde. Auffällig ist, dass sich die bestätigten Anforderungen 1) und 3), die sich beide an den Winkel TE richten, widersprechen. Ein solches Ergebnis wurde im Vorfeld schon für möglich erachtet (vgl. Kapitel 4.6.6 bzw. 6.1.2). Damit dieser Widerspruch aufgelöst werden kann, wird ein Entscheidungsmodell entwickelt und angewendet.

Die anderen beiden Anforderungen sind unter Vorbehalt bestätigt; hier ist noch offen, wie mit sehr großen Werten für den Winkel 2T umzugehen ist.

Von Interesse ist darüber hinaus die Frage, welche Kombinationen von TE und 2T üblicherweise auftreten bzw. sich unter bestimmten Entwurfsrandbedingungen aufgrund der geometrischen Abhängigkeiten ergeben. Da die angesprochenen „großen Werte“ für 2T offensichtlich nur sehr selten vorkommen (zu wenige für eine eigene Prüfparameterkategorie), ist weiterhin zu untersuchen, ob diese bspw. nur bei äußerst unregelmäßigen Anlagen auftreten. Je nach Ergebnis dieser Überprüfungen könnte die Relevanz für tiefgreifende Untersuchungen zur Folge von „größeren Werten“ für 2T an Gewicht verlieren.

7.4.2 Zusammenführen der Anforderungen an Winkel TE

Anforderung 1) in Bezug zu Fahrnfällen verlangt zur Risikominimierung möglichst große Winkel TE, gemäß Anforderung 3) in Bezug zu EK-Unfällen soll Winkel TE hingegen möglichst klein werden. Das Ziel ist, das Risiko des Auftretens beider Unfalltypen gleichzeitig und möglichst weitreichend zu minimieren. Gemäß der Entscheidungstheorie liegt hier ein Zielkonflikt mit zwei möglichen Zielgrößen vor (LAUX ET AL., 2014). Zur Lösung dieses Entscheidungsproblems wird ein grafisches Entscheidungsmodell für zwei Zielgrößen herangezogen.

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, dass in einem solchen Entscheidungsmodell die einzelnen Zielgrößen unterschiedlich gewichtet werden können, um eine der beiden Anforderungen stärker zu berücksichtigen. Die RIS-P-Werte liegen bei der Überprüfung zu Anforderung 3) etwas höher als bei Anforderung 1), wonach diese Anforderung in einem internen Vergleich etwas stärker gewichtet werden könnte. Eine Überlagerung der beiden Risikokennzahlverläufe zeigt einen Schnittpunkt der beiden Regressionsgeraden außermittig im Bereich der Prüfparameterkategorie 2 (Werte zwischen 1,24 und 2,93 gon), was deutlich näher am Minimum dieser Regressionsgeraden liegt als am Minimum der Regressionsgeraden zu Anforderung 1) (vgl. Bild 7.5). Daher wird von einer stärkeren Gewichtung von Anforderung 3) abgesehen, um Anforderung 1) nicht zu gering zu berücksichtigen.

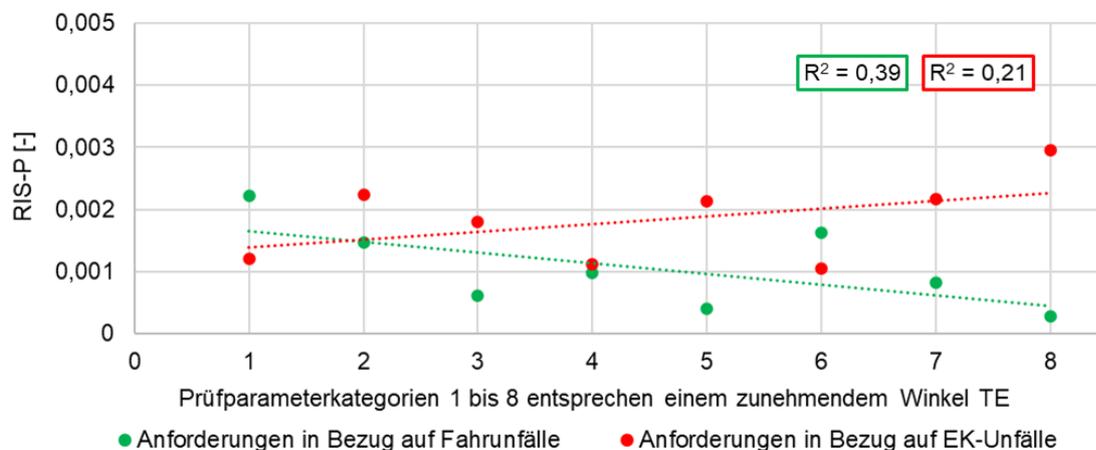


Bild 7.5: Überlagerte Risikokennzahlentwicklungen bei unterschiedlichen Anforderungen für den Winkel TE (bei 5j UR Utyp 1 und 5j UR Utyp 3)

Zur grafischen Lösung mit einem Entscheidungsmodell auf der Basis von Indifferenzkurven wird zunächst eine Nutzenfunktion benötigt. Unterschieden wird u.a. in Nutzenfunktionen für perfekte oder imperfekte Substitute, d.h. die betrachteten Aspekte können entweder ohne Nutzeneinbußen gegeneinander ausgetauscht werden (perfekte Substitution) oder sie unterscheiden sich bei ähnlichem Nutzen in bestimmten Merkmalen, was zu einer imperfekten Substitution führt (BLECH, 2020). Da die Theorie aus den Wirtschaftswissenschaften stammt, originär für austauschbare Güter angewendet wird und für eine Übertragbarkeit der Randbedingungen auf die hier vorgenommenen Risikobetrachtungen keine Erfahrungswerte vorliegen, werden beide Ansätze parallel und gleichwertig betrachtet. Für beide Arten der Substitution existieren typische Nutzenfunktionen: Perfekte Substitute werden in der Nutzenfunktion stets mit einer Addition verbunden (vgl. Formel (18)), während für imperfekte Fälle eine Multiplikation vorgesehen ist. Üblicherweise wird für imperfekte Substitute die sogenannte Cobb-Douglas-Funktion mit Wichtungsparemtern verwendet (vgl. Formel (19)). Da eine Gewichtung nicht vorgesehen ist, kann die Formel vereinfacht werden und die beiden Wichtungsparemtern entfallen.

$$U = Z_1 + Z_2 \quad (18)$$

$$U = (Z_1)^a \cdot (Z_2)^b \rightarrow U = Z_1 \cdot Z_2 \quad (19)$$

mit:

U = Nutzenfunktion

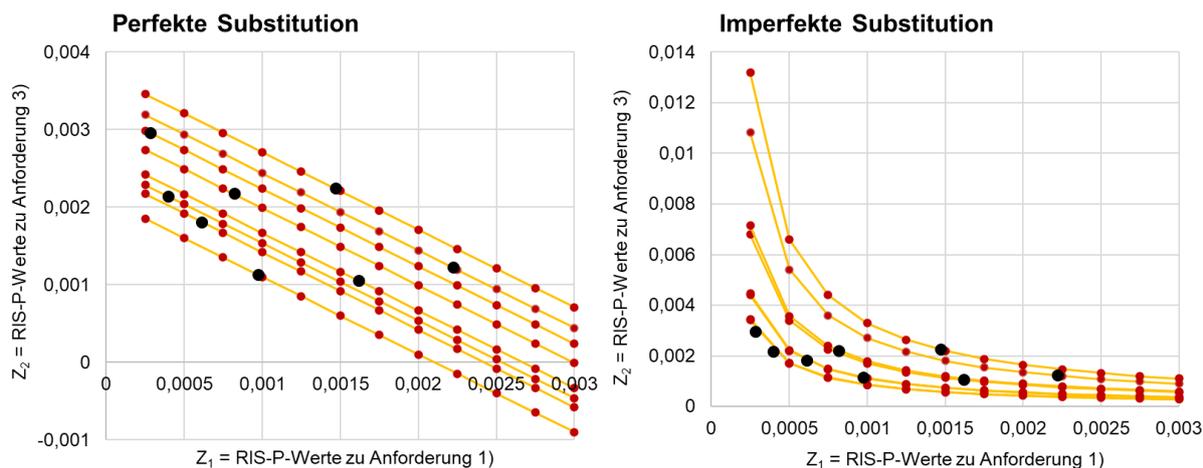
Z₁ = Zielgröße 1

Z₂ = Zielgröße 2

(a, b = Wichtungsparemtern der Cobb-Douglas-Funktion)

Beide Formeln nach BLECH (2020).

Als Zielgrößenpaarungen (Z₁,Z₂) werden jeweils die RIS-P-Wertepaare je Prüfparameterkategorie verwendet. Für jedes Zielgrößenpaar kann jeweils eine spezifische Indifferenzkurve abgeleitet werden. Solche Indifferenzkurven beschreiben die Lage aller Punkte im (Z₁,Z₂)-Raum, die gemäß der Nutzenfunktion den gleichen Nutzen aufweisen (indifferent sind). Indifferenzkurven haben die Eigenschaft, dass sie sich nicht schneiden und negative Steigungen aufweisen (für perfekte Substitution linear, für imperfekte Substitution exponentiell fallend). Anschaulich gesehen beschreibt eine Indifferenzkurve einen umso größeren Nutzen als eine andere Indifferenzkurve, „je weiter rechts oben sie im [(Z₁,Z₂)]-Koordinatensystem verläuft“ (LAUX ET AL., 2014). Anzumerken ist für den vorliegenden Anwendungsfall, dass hier die Nutzenfunktion keinen „gewinnbringenden“ Nutzen beschreibt, sondern die Kombination der beiden Risikokennzahlen zu einem negativen „Nutzen“ führt. Der größte „Nutzen“ entspricht demnach dem größten Risiko. Gesucht werden also diejenigen Indifferenzkurven, die möglichst



Erläuterung:

Die (Z_1, Z_2) -Paare der RIS-P-Werte aus Anforderung 1) und 3) sind jeweils mit schwarzen Punkten dargestellt.

Bild 7.6: Darstellung der vereinfachten Indifferenzkurven für die RIS-P-Werte aus Anforderungen 1) und 3)

nahe am Ursprung verlaufen. Gemäß LAUX ET AL. (2014) „kann es sinnvoll sein, nur wenige Punkte der einzelnen Indifferenzkurven explizit zu bestimmen und dann die jeweils äquivalenten Punkte miteinander zu verbinden“. In Bild 7.6 wurde dieses vereinfachte Vorgehen anhand der rot hervorgehobenen Stützwerte für beide Nutzenfunktionen umgesetzt: Die perfekte Substitution gemäß Formel (18) auf der linken, die imperfekte Substitution gemäß Formel (19) auf der rechten Seite. In der Abbildung zur imperfekten Substitution liegen die vier Kurven, die dem Ursprung am nächsten sind, recht eng zueinander. Auch in der linken Abbildung zeigt sich anschaulich ein gewisser Abstand zwischen den vier Kurven, die dem Ursprung am nächsten liegen, und den vier anderen Kurven.

In Tabelle 7.5 ist die Reihenfolge der Indifferenzkurven für die Wertekombination der RIS-P-Werte jeder Prüfparameterkategorie angegeben, mit der Nummerierung beginnend bei derjenigen Kurve, die dem Ursprung am nächsten liegt. Grün hervorgehoben sind jeweils diejenigen

| Prüfparameterkategorie (PPK) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| Kategorieuntergrenze TE [gon] | 0 | 1,24 | 2,93 | 4,63 | 6,33 | 8,03 | 9,73 | 11,4 |
| Kategorieobergrenze TE [gon] (exkl.) | 1,24 | 2,93 | 4,63 | 6,33 | 8,03 | 9,73 | 11,4 | ∞ |
| Perfekte Substitution: Reihenfolge der Indifferenzkurven vom Ursprung aus gesehen | 7 | 8 | 2 | 1 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Imperfekte Substitution: Reihenfolge der Indifferenzkurven vom Ursprung aus gesehen | 7 | 8 | 4 | 3 | 2 | 5 | 6 | 1 |

Erläuterung: Nummerierung der Reihenfolge erfolgt jeweils beginnend bei derjenigen Kurve, die dem Ursprung am nächsten liegt. Die ersten vier Kurven sind grün, die weiteren vier rot unterlegt.

Tabelle 7.5: Reihenfolge der Indifferenzkurven für perfekte bzw. imperfekte Substitution

vier Kurven, die dem Ursprung am nächsten liegen. Das Ergebnis für beide Arten der Substitution offenbart eine Übereinstimmung der grünen Felder im mittleren Wertebereich der Prüfparameterkategorien 3, 4 und 5. Daher werden die Werte für TE, die innerhalb dieser PPK liegen, als Zielwerte für den Winkel TE angesetzt. Die Zielwerte bewegen sich damit zwischen 3,0 und 8,0 gon.

Bereits in Kapitel 5.4.5 wurde herausgearbeitet, dass vergleichsweise hohe Unfallraten für EK-Unfälle bei Einfahrtgeschwindigkeiten ab etwa 33 km/h auftreten. Der Vergleich mit Bild 5.22 zeigt, dass die linearen Regressionsgeraden für Zusammenhänge MS 2 und MS 3 (dem Bereich der Einfahrt) für TE im Bereich von 3,0 bis 8,0 gon jeweils V_{85} -Geschwindigkeitswerte zwischen ca. 30 und 33,5 km/h ergeben.

7.4.3 Zusammenführen der Anforderungen an Winkel 2T

Die Validierung der Anforderungen 4) und 5) erbrachte insgesamt sehr ähnliche Ergebnisse: Die Risiken sinken jeweils mit Zunahme des Winkels 2T (die entsprechenden Kategorieuntergrenzen sind 43,7 bzw. 44,6 gon; der Mittelwert der entsprechenden Prüfparameterkategorien liegt jeweils bei etwa 55 bzw. 60 gon). Dennoch stellt sich die Frage, wie groß der Winkel 2T maximal werden sollte, denn diese Kategorien haben beide keine Obergrenze. Eine Betrachtung der Ausgangsdaten zeigt, dass 2T in drei Fällen Werte zwischen 90 und 100 gon annimmt; dabei konnten keine Zusammenhänge zwischen einem sehr großen Wert von 2T und der Risikokennzahlentwicklung innerhalb der Kategorie herausgearbeitet werden. Die Kreisverkehre mit sehr großem Winkel 2T an einer Zufahrt weisen tlw. stark außermittige Kreisinseln auf, was bei anderen Zufahrten wiederum zu sehr kleinen 2T-Werten führt (vgl. beispielhaft Bild 5.24), oder die Zufahrten weisen bei dreiarmigen Anlagen ähnlich große Winkel zwischen den zuführenden Straßen auf.

Für kleine 2T-Werte (unter 40 gon) ergeben sich fast zwangsläufig TE-Werte, die über dem oberen Grenzwert des Zielwertbereichs von 8,0 gon liegen (vgl. Bild 7.7). Anhand der Fahrverhaltensuntersuchung konnte am Kollektiv 1.4 festgestellt werden, dass die Zusammenhänge zwischen 2T und den Geschwindigkeiten im Zuge der Kreisverkehrsdurchfahrt jeweils quadratischer Natur sind – die Geschwindigkeit ist danach minimal für mittlere Winkel 2T zwischen ca. 40 und 60 gon (vgl. Bild 5.25).

Für Winkel 2T in dieser Größenordnung lässt sich gemäß der Verteilung im Kollektiv 1.3 auch ein Winkel TE in der angestrebten Größenordnung auch tatsächlich als bauliche Anlage umsetzen (vgl. Bild 7.7). Da „zu kleine 2T“ zu vermeiden sind, ist die Möglichkeit, dass sich in der Gegenrichtung „zu große“ 2T-Werte entwickeln, recht eingeschränkt. Aus diesem Grund wird für weitere Untersuchungen zu sehr großen Winkeln (2T größer 60 gon), die zuvor möglicherweise als notwendig erachtet wurden (vgl. Kapitel 7.4.1), nunmehr keine Relevanz gesehen.

Als Zielwert für 2T wird daher 45 bis 60 gon angesetzt.

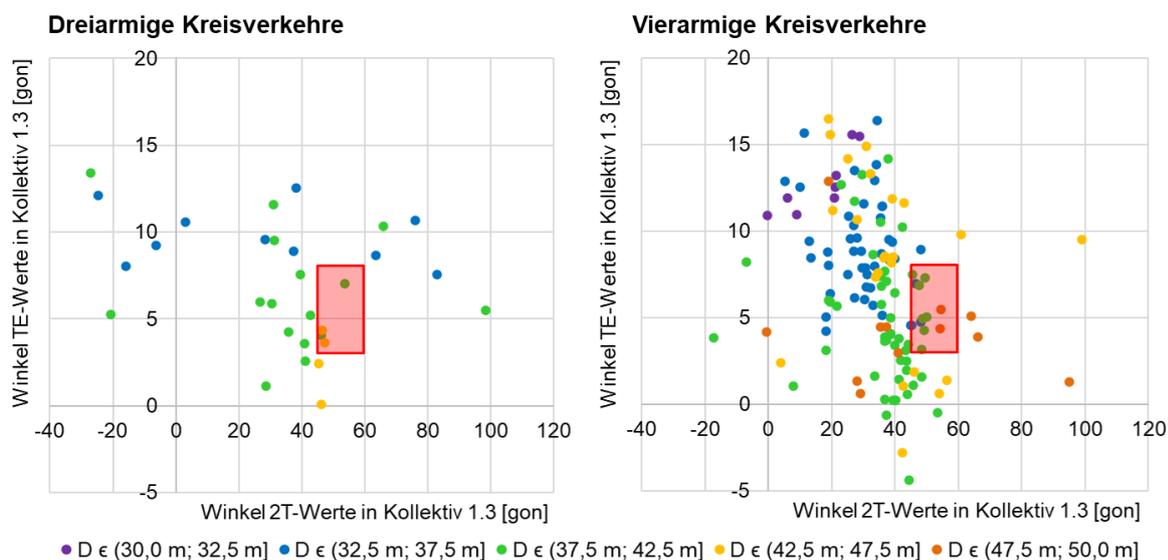
Auch hier ergibt der Abgleich mit der in Kapitel 5.4.5 herausgearbeiteten, kritischen Einfahrgeschwindigkeiten ab etwa 33 km/h für die Unfallraten für EK-Unfälle, dass die Regressionskurven in Bild 5.25 für 2T im Bereich von 45 bis 60 gon jeweils die niedrigsten V_{85} -Geschwindigkeitswerte zwischen ca. 30 und 32 km/h ergeben.

7.4.4 Sensitivitätsbetrachtungen

Auch wenn die erarbeiteten Ergebnisse allesamt nachvollziehbar erscheinen, so bieten einige Aspekte Anlass, die Belastbarkeit der Validierungsuntersuchungen zu hinterfragen:

- 1) Bei der Risikokennzahlentwicklung zur Überprüfung der formulierten Anforderungen scheint die Richtung und Neigung der Regressionsgeraden stark durch die Lage des ersten und letzten Wertes der Reihe beeinflusst zu werden (vgl. z.B. Bild 7.2).
- 2) Bei der gemeinsamen Überlagerung der gemessenen Werte für Winkel TE und Winkel 2T im Kollektiv 1.3 zeigt sich, dass im Bestand nur recht wenige Werte im Bereich der erarbeiteten Zielwerte liegen (vgl. Bild 7.7).

Zu Punkt 1): Um die Belastbarkeit der gewählten Annahmen bzw. Abgrenzungen insgesamt zu prüfen, wurden für die Grenzen der Schadensmaß- und Prüfparameterkategorien sowie für die Wichtungsfaktoren auch andere Werte getestet (bspw. $w_i = i$). Auch die Quantilswerte bei der Kategorie-Einteilung wurden iterativ variiert, bspw. wurden 5 %- oder 15 %-Quantile angewendet. Hierdurch ergaben sich naturgemäß Schwankungen in der Ausprägungsstärke; die Tendenzen waren jedoch, soweit keine besonderen Beeinflussungen wie z.B. durch leere Kategorien auftraten, alle übereinstimmend. Die gewählten Maße wie etwa die 10 %-Quantile bieten dabei auch im Schnitt über alle Aussagen die wenigsten „Ausreißer“.



Erläuterung: Der Bereich der „sehr guten“ Zielwerte für die beiden Prüfgrößen TE und 2T ist rot unterlegt

Bild 7.7: Kombinationen von Winkel TE und Winkel 2T im Kollektiv 1.3

Zu Punkt 2): In Bild 7.7 sind für Kollektiv 1.3 – getrennt für drei- und vierarmige Kreisverkehre – die Kombinationen der Winkel TE und 2T aufgetragen. Insbesondere bei dem größeren Teilkollektiv der vierarmigen Kreisverkehre wird dabei deutlich, dass sehr kleine Anlagen mit einem Außendurchmesser $D \leq 32,5$ m (lila Punkte) sehr deutlich und auch etwas größere Anlagen mit D zwischen 32,5 und 37,5 m (blaue Punkte) größtenteils recht weit entfernt vom Bereich der erarbeiteten Zielwerte für die beiden Prüfgrößen TE und 2T liegen. Es ist daher zu erwarten, dass auch unter „optimalen“ Entwurfsrandbedingungen ein Erreichen dieser Zielwerte für kleinere Kreisverkehre schwierig sein wird. Während sich der Schwerpunkt der grün markierten Kreisverkehre schon deutlich in Richtung der Zielwerte bewegt und einige im Bereich der Zielwerte liegen, streuen die gelb markierten Kreisverkehre recht stark um den Zielwertbereich herum. Diese Streuung gilt auch für sehr große Anlagen mit D größer 47,5 m, allerdings liegen diese bis auf eine Ausnahme im „unteren Drittel“ der erreichbaren TE-Werte (zwischen 0,0 und 5,0 gon). Dies zeigt, dass tendenziell ab einer Anlagengröße (Außendurchmesser) von ca. $D = 37,5$ m Kreisverkehre umsetzbar sind, die den erarbeiteten Kriterien entsprechen oder ihnen zumindest in einem (noch zu definierenden) Maße ausreichend nahekommen. Zu diesen Auswertungen passt die Erkenntnis aus der Literaturrecherche, wonach „größere“ Anlagen tendenziell sicherer sind (vgl. RICHTER UND HÜSKEN, 1993, bzw. Kapitel 2.3). Allerdings finden sich in der ausgewerteten Literatur auch gegensätzliche Darlegungen, wonach größere Anlagen kritisch sind; diese Aussagen beziehen sich aber auf Situationen mit tendenziell „tangentialen“ Zufahrtsbedingungen (vgl. z.B. SPAHN UND BÄUMLER, 2007) oder auf Entwurfsrandbedingungen aus dem Ausland, wo tangentielle Zufahrtsbedingungen vorherrschen (vgl. GAMBARD UND ALPHAND (1991) für Frankreich)¹². Da sich bei solchen „tangentialen“ Zufahrtsbedingungen andere Werte der Prüfparameter ergeben, widerlegen diese Aussagen die hier erarbeiteten Kriterien nicht. Außerdem zeigt sich in Bild 7.7, dass bei dreiarmigen Kreisverkehren eine größere Variation an Anordnungen der Zufahrten untereinander nicht nur möglich ist, sondern auch praktiziert wird, denn die 2T-Werte streuen vergleichsweise stark (links), während bei den vierarmigen Kreisverkehren ein durch die Abhängigkeiten sich zwangsläufig ergebender Schwerpunkt erkennbar ist (rechte Seite).

Eine weitere Möglichkeit zum qualitativen Testen der Belastbarkeit der Ergebnisse bietet eine Überlagerung von Unfallkennwerten (hier: Kollektiv 1.3) mit den Prüfparametern – auch wenn dies keine Validierung im eigentlichen Sinne ist, da dieses Kollektiv ja bereits zur Erarbeitung der Prüfparameter herangezogen wurde. Diese Auswertung wurde getrennt für Unfälle vom Unfalltyp 1 bzw. vom Typ 3 durchgeführt als auch in einer überlagerten Betrachtung. Damit bei

¹² Auch weitere, vergleichende Literaturstudien über Ergebnisse aus dem Ausland verwenden tendenziell Kategorien mit zu weit gefassten Grenzen (z.B. ein Kreisinseldurchmesser von 20 bis 40 m bei JENSEN (2014)); zudem sind bspw. die Entwurfsrandbedingungen der Zufahrt unklar.

einer überlagerten Betrachtung wie bspw. durch eine Addition der Unfallkennwerte keine besonderen Verzerrungen etc. entstehen, werden nur diejenigen Zufahrten in die Überlagerung mit einbezogen, an denen nur einer der beiden Unfalltypen aufgetreten ist (der also in genau einer Hinsicht einen besonderen „Mangel“ aufweist). Als Unfallkennwert wurde die Unfallrate UR herangezogen. Das in Bild 7.8 abgebildete Ergebnis der Überlagerung zeigt auf, dass hohe und sehr hohe Unfallraten (dunkelrot bzw. lila markiert) im Regelfall in zwei Fällen auftreten:

- Hohe Unfallraten (dunkelrot) treten verbreitet auf, wenn die Mindestwerte von 2T *oder* TE unterschritten werden
- Sehr hohe Unfallraten (lila) finden sich fast ausschließlich dann, wenn die Mindestwerte von 2T unterschritten *und* die Höchstwerte von TE überschritten werden.

Dies zeigt recht deutlich, dass grundsätzlich die Mindestwerte für beide Prüfparameter nicht gleichzeitig unterschritten werden sollten. Darüber hinaus ist besonders auffällig, dass sich eine Kombination einer Unterschreitung des 2T-Mindestwertes mit einer Überschreitung des TE-Maximalwertes noch deutlicher auf die Unfallrate auswirkt; dies stellt somit die schlechteste Kombination dar und ist in jedem Fall zu vermeiden. Diese Erkenntnisse gelten vom Grundsatz her für beide Unfalltypen; Auswertungen bezogen nur auf die Unfalltypen 1 und 3 finden sich in Anlage 14.14 (vgl. dort Bild 14.47 und Bild 14.48). Die kombinierte Überlagerung der Unfallraten beider Unfalltypen durch Addition ergibt aufgrund der Durchmischung erwartungsgemäß ein weniger aussagekräftiges Bild (vgl. Bild 14.49 in Anlage 14.14).

Weitere Überlegungen zu tolerierbaren Abweichungen von den Zielwerten finden sich in Kapitel 8.

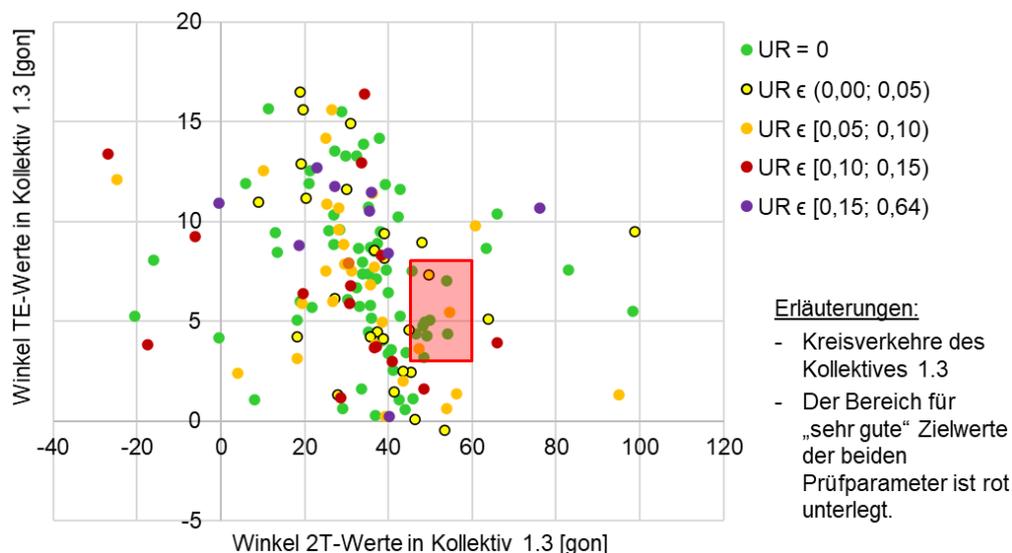


Bild 7.8: Überlagerung der Prüfparameter mit UR der Unfalltypen 1 und 3 an denjenigen Zufahrten, an denen jeweils nur einer der beiden Unfalltypen aufgetreten ist

7.5 Fazit zu den Prüfkriterien

Es stehen nun Prüfkriterien zur Verfügung, deren Einhaltung im Entwurfsprozess neuer Kreisverkehrsanlagen eine hohe Sicherheit bietet, dass der Kreisverkehr zu einem Fahrverhalten beiträgt, welches möglichst wenig anfällig für Unfälle ist. In Tabelle 7.6 sind die erarbeiteten und validierten Werte für die Prüfkriterien Winkel TE und Winkel 2T zusammengefasst. Wie bereits erwähnt, wäre auch mit dem Winkel β_{CH} eine Sicherheitsanalyse ohne Erkenntnisverlust möglich; der Abgleich mit der Regressionsgerade in Bild 5.26 zeigt auf, dass dann – abgeleitet vom Empfehlungsbereich für Winkel 2T – für β_{CH} dieser Arbeit zufolge Werte von etwas über 60, aber unter 80 gon Sicht erstrebenswert sind.

| Prüfkriterium | Winkel TE | Winkel 2T |
|----------------------|-----------|-----------|
| Mindestwert [gon] | 3,0 | 45 |
| Maximaler Wert [gon] | 8,0 | 60 |

Tabelle 7.6: Zusammenfassung der erarbeiteten und validierten Werte für die Prüfkriterien

8 Folgen der Prüfkriterien für den Kreisverkehrsentwurf

8.1 Allgemeines

Das deutsche Regelwerk für den Straßenentwurf beinhaltet, genauso wie die entsprechenden Regelwerke in anderen Ländern, Entwurfsvorgaben für Kreisverkehre, die nicht starr an bestimmte Parametergrößen gebunden sind. Vielmehr können bzw. sollen die Entwurfparameter je nach Platzverhältnissen bzw. Grundstücksverfügbarkeit, Ausrichtung der anzuschließenden Straßen, Verkehrsbelastung oder Netzbedeutung innerhalb vorgegebener Grenzen angepasst oder variiert werden (vgl. Kapitel 2.1.2); nicht zuletzt kommt bei der Regelwerksauslegung auch dem „Erfahrungsschatz“ des Planers eine gewisse Rolle zu. Die Auswertung der Geometrie bestehender Kreisverkehre in dieser Arbeit hat gezeigt, dass – sei es im Einzelfall noch begründet – diese Grenzen nicht nur ausgereizt oder geringfügig, sondern tlw. deutlich überschritten bzw. Zielwerte verfehlt werden (vgl. Kapitel 4.3, dort u.a. Bild 4.6 und Bild 4.11).

In diesem Kapitel wird untersucht, wie die Prüfparameter TE und 2T angewendet werden können, wie sie sich in die bestehenden Entwurfsvorgaben integrieren lassen, inwieweit anhand der Entwurfsvorgaben ggfs. Toleranzen bei den Prüfparametern zulässig oder erforderlich sind und welche Möglichkeiten sich über die bisherige Entwurfspraxis hinaus ergeben.

Hierbei werden die Prüfparameterwerte in den erarbeiteten Grenzen von Tabelle 7.6 als „Zielwerte“ benannt und innerhalb dieser Grenzen als „sehr gut“ bezeichnet. Der durch diese Werte grafisch begrenzte Raum ist der „Empfehlungsbereich“ bzw. das „Empfehlungsfeld“.

8.2 Anwendung an vierarmigen Kreisverkehren

8.2.1 Vergleichsgrundlagen für regelmäßige Entwurfssituationen

Grundformen und Größenstufen

Zur Erprobung der Anwendbarkeit der Prüfparameter in der Entwurfspraxis werden fünf Größenstufen von Kreisverkehren festgelegt, die sich am Spektrum der zulässigen Werte des Merkblatts für die Anlage von Kreisverkehren orientieren (anhand der dortigen Tabelle 1); die dort vorgegebene Bandbreite bzgl. der Zuordnungen wird für sinnvoll und erprobt angesehen und daher im Rahmen dieser Untersuchungen nicht variiert oder über- bzw. unterschritten (vgl. Tabelle 8.1). Ebenfalls feststehend, und auch für alle Größenstufen identisch, sind die Werte für die Breite des Fahrbahnteilers (2,50 m) bzw. die Länge des Fahrbahnteilers (Ende 11,25 m von der Kreisfahrbahn entfernt, entsprechend den Vorgaben der RAL (2012)).

Andere Parameter, für die das technische Regelwerk unterschiedliche Wertebereiche vorsieht, wie insbesondere der „Ausrundungsradius der Zufahrt“ R_Z (und damit auch derjenige der Zufahrt R_A) sowie die „Breite der Fahrbahn“ in der Zufahrt B_Z (entsprechend auch B_A) werden bei der ersten Teiluntersuchung hingegen variiert. In den nachfolgenden Betrachtungen werden

| Größenstufe | KV 1 | KV 2 | KV 3 | KV 4 | KV 5 |
|--|------|------|------|------|------|
| Außendurchmesser D [m] | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| Kreisinselradius R _i [m] | 7,0 | 10,5 | 13,5 | 16,0 | 18,5 |
| Kreisfahrbahnbreite B _k [m] | 8,0 | 7,0 | 6,5 | 6,5 | 6,5 |

Tabelle 8.1: Im Rahmen der Untersuchung nicht variierte Entwurfsparameter (gemäß M KV, 2006)

insbesondere die Auswirkungen verschiedener Achsausrichtungen bewertet. Mit der Straßenentwurfs-Software VESTRA wurden anhand der Wertekombinationen gemäß Tabelle 8.1 für jede Größenstufe die entsprechenden Kreisverkehre trassiert und die Werte für TE und 2T ermittelt.

Die zunächst untersuchte Anordnung mit rechtwinkligen, nicht versetzten Achsen bildet die „Grundform“ für einen vierarmigen Kreisverkehr: Alle Achsen der zuführenden Straßen schneiden sich rechtwinklig in einem Punkt, der gleichzeitig der Mittelpunkt der Anlage ist. Daher wurden anhand der Grundform nicht nur die verschiedenen Größenstufen gemäß Tabelle 8.1, sondern auch die beiden Parameter „Ausrundungsradius der Zufahrt (bzw. Ausfahrt)“ R_Z bzw. R_A sowie „Breite der Zufahrt (bzw. Ausfahrt)“ B_Z bzw. B_A variiert, um insbesondere deren Auswirkungen beurteilen zu können (vgl. Tabelle 8.2).

Die ermittelten Werte für 2T und TE zeigt Bild 8.1; die Entwicklung der Wertepaare lässt sich jeweils fast passgenau gut durch eine quadratische Regression abbilden (daher sind diese mit dargestellt). Dabei wird deutlich, dass die erreichbaren Werte für TE und 2T insbesondere für Kreisverkehre mit kleinem Außendurchmesser sehr weit von den anvisierten Werten im Empfehlungsbereich entfernt sind, unabhängig von den Ausprägungen der Parameter an der Zufahrt (bzw. Ausfahrt).

| Kombination, Beschreibung | | Breite der Zufahrt (bzw. Ausfahrt) B _Z bzw. B _A | | |
|--|---|--|---|--|
| | | (1) Kleine Werte für B _i : B _Z = 4,0 m B _A = 4,75 m | (2) Mittlere Werte für B _i : B _Z = 4,5 m B _A = 5,0 m | (3) Große Werte für B _i : B _Z = 5,0 m B _A = 5,5 m |
| Ausrundungsradius der Zufahrt (bzw. Ausfahrt) R _Z bzw. R _A | (1) Kleine Werte für R _i : R _Z = 14,0 m R _A = 16,0 m | Kombination 1-1 | Kombination 1-2 | Kombination 1-3 |
| | (2) Mittlere Werte für R _i : R _Z = 15,0 m R _A = 17,0 m | X | Kombination 2-2 | X |
| | (3) Große Werte für R _i : R _Z = 16,0 m R _A = 18,0 m | Kombination 3-1 | Kombination 3-2 | Kombination 3-3 |

Tabelle 8.2: Untersuchte Kombinationen der Parameter B_Z bzw. B_A mit R_Z bzw. R_A

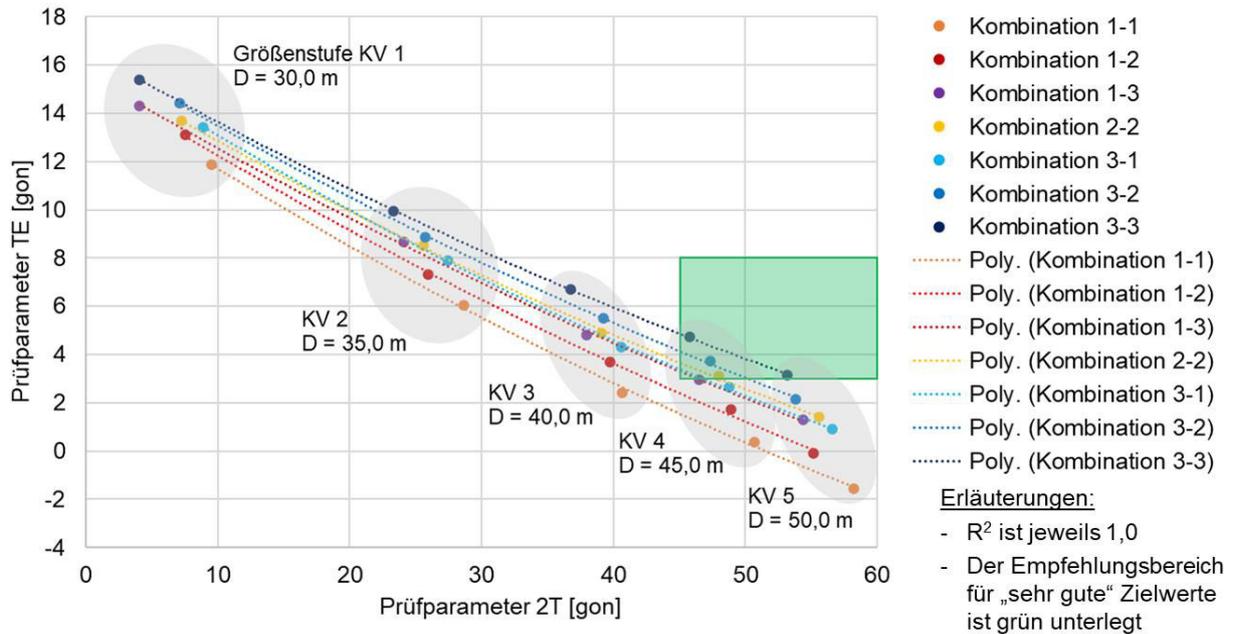


Bild 8.1: Überlagerte Werte für TE bzw. 2T für die Kombinationen der Parameter R_z bzw. R_A sowie B_z bzw. B_A gemäß Tabelle 8.2

(Vgl. hierzu auch Anmerkung in Kapitel 8.2.5)

Insgesamt erreichen die Kombinationen 3-2 und 3-3 mit den eher großen Ausrundungsradien den gemeinsamen, „sehr guten“ Wertebereich von 2T und TE (grün unterlegt), die Kombinationen 1-3, 2-2 und 3-1 berühren diesen Bereich in der unteren linken Ecke. Auffällig ist, dass nur Anlagen mit einem vergleichsweise großen Außendurchmesser (ab ca. 44 m) sehr gute Ergebniskombinationen der Prüfparameter erreichen. Die Einzelauswertung für jeden Prüfparameter in Abhängigkeit vom Außendurchmesser zeigt, dass Kreisverkehre ab einem Außendurchmesser von ca. $D = 35$ m bis ca. 45 m separat betrachtet die Anforderungen an das Prüfkriterium TE gut erfüllen, hingegen Kreisverkehre ab $D =$ ca. 45 bis ca. 50 m gute Ergebnisse für den Prüfparameter 2T erreichen (vgl. im Einzelnen auch Anlage 14.15).

Daher sind als Hauptbestandteil des Untersuchungsschrittes Überlegungen zur Konstruktion von Kreisverkehren anzusetzen, die – vrstl. in gewisser Weise abweichend von der o.a. Grundform – ein praktisches Umsetzen der an die Prüfkriterien gestellten Anforderungen zulassen. Für die kleineren Kreisverkehre stellt sich vereinfacht gesagt die Frage, wie der 2T-Wert erhöht werden kann, für die größeren Kreisverkehre, wie der Winkel TE vergrößert werden kann, jeweils ohne den anderen Prüfparameter maßgeblich anzutasten, der in beiden Fällen die angestrebte Größenordnung bereits aufweist.

Im Folgenden wird die Größenstufe KV 1 nicht weiter betrachtet, da die Ergebnisse für TE und 2T hierfür grundsätzlich zu weit entfernt vom Empfehlungsbereich liegen.

Ausrundungsradien und Fahrbahnbreiten für Zu- und Ausfahrt

Für die weiteren Untersuchungen zu Konstruktionsüberlegungen (z.B. zu Achsausrichtungen) wird eine der Kombinationen gemäß Tabelle 8.2 ausgewählt. Neben dem Vergleich der Kombinationen untereinander und der jeweils erreichbaren Prüfparameter wurden zu diesem Auswahlprozess auch Erkenntnisse aus vorherigen Untersuchungsschritten hinzugezogen:

- Die Regressionsanalysen zeigten Zusammenhänge zwischen hohen UKR für Unfälle des Unfalltyps 3 und zunehmenden Werten von R_z auf (vgl. Kapitel 4.6.4). Zwar konnten im weiteren Verlauf die unfallbegünstigenden hohen Geschwindigkeitsspannweiten keinem Prüfparameter zugeordnet werden, dafür konnte eine Korrelation von steigender Geschwindigkeitsspannweite mit einem größer werdenden B_z ermittelt werden (vgl. Kapitel 5.5.3). Allerdings entsprechen die hier untersuchten „maximalen“ Werte für R_z bzw. B_z dem Regelwerk (M KV) – und das sind im Vergleich mit der Praxis nicht die maximal vorfindbaren Werte. Hier sei auch auf das niederländische Entwurfsregelwerk verwiesen, das mit dem Satz : „Ein- und Ausfahrstrassen sollen so klein wie möglich sein“ (V&W, 2009) deutlich Position bezieht (vgl. Kapitel 2.2.4).
- Die Kombinationen 1-3, 2-2 und 3-1 erreichen in Bild 8.1 anschaulich recht ähnliche Ergebnisse. In Tabelle 8.2 entspricht dies einer gedachten Diagonale von links unten nach rechts oben. Insgesamt sind diese drei Kombinationen als etwa gleichwertig anzusehen.

Da in den folgenden Schritten verschiedene Achs- und Zufahrtsanordnungen untersucht werden sollen, deren Auswirkung möglicherweise durch eine große Einzelgröße (hier die jeweils vergleichsweise größten Werte für B_i bei Kombination 1-3 bzw. den vergleichsweise größten Wert für R_i bei Kombination 3-1) verwässert werden kann, wird hierfür grundsätzlich Kombination 2-2 gewählt. Dass die Regressionsgerade von Kombination 2-2 das Empfehlungsfeld in der Grundform nur tangiert, wird aus zwei Gründen nicht als Mangel gesehen: Zum einen hat es sich gezeigt, dass die Einzelzielwerte für beide Prüfparameter erreicht werden können, zum anderen werden in diesem Kapitel auch mögliche – zulässige oder erforderliche – Abweichungen von den zuvor „theoretisch“ erarbeiteten Zielwerten der Prüfparameter diskutiert, um die Prüfparameter handhabbar für die Entwurfspraxis zu gestalten. Dies geschieht nicht zuletzt im Hinblick auf eine verbreitet anwendbare Anlagengröße.

Einschätzung zur Praxistauglichkeit

Im Kollektiv 1.2 mit seinen 138 Kreisverkehren verfügen nur gut 20 % der Anlagen über einen Durchmesser von 42,5 m oder mehr, für die diese Elementkonstellationen zum Einhalten der Prüfparameter somit zur Anwendung kommen könnten. Üblicherweise fällt bei der Planung bzw. dem Bau von Kreisverkehren ein Grundstücksmehrbedarf gegenüber einem sonstigen plangleichen Knotenpunkt an. Denkbar sind auch bauliche oder topografische Restriktionen,

sodass ein Kreisverkehr eher klein ausfallen muss. Vom Kollektiv 1.2 weisen fast die Hälfte der Kreisverkehre (47 %) einen Kreisdurchmesser zwischen 35 und 40 m auf (vgl. Bild 14.3 in Anlage 14.2). Es ist daher im Folgenden auch zu überprüfen, ob bzw. wie Regellösungen für kleinere Kreisverkehre gestaltet werden können.

8.2.2 Diskussion tolerierbarer Abweichungen

Es stellt sich die Frage, ob es zwingend erforderlich ist, dass die Zielwerte immer akkurat eingehalten werden, oder ob innerhalb gewisser Grenzen Abweichungen toleriert werden können. Falls solche Abweichungen zulässig sind, ist weiterhin zu überlegen, welchen „Umfang“ diese nicht überschreiten sollten.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Risikokennzahlen RIS-P für die Anforderungen an Winkel 2T relativ und absolut größer sind (vgl. Kapitel 7); eine Abweichung vom Zielwert würde hier also ein relativ höheres zusätzliches Risiko nach sich ziehen. Allerdings ergeben die Untersuchungen in diesem Kapitel, dass Werte für 2T von mind. 45 gon für Außendurchmesser $D < 44$ m unter regelmäßigen Bedingungen nicht erreicht werden können, Werte für 2T von über 40 gon sind aber durchaus erreichbar. Der Vergleich mit Bild 7.8 belegt, dass die höchsten, rot und lila eingetragenen UR bis auf wenige Ausnahmen nur für 2T kleiner 40 gon auftreten. Somit kann sowohl im Sinne des Sicherheitsgedankens als auch der Praktikabilität ein Wert ab $2T = 40$ gon als noch „brauchbar“ angesehen werden, sofern keine besseren Lösungen für diese Anlagengröße vorliegen und der Außendurchmesser nicht geändert werden kann. Überschreitungen der Obergrenze von $2T = 60$ gon sind hingegen zu vermeiden; auch wenn hierzu zwar keine spezifischen und mengenmäßig belastbaren Untersuchungen herangezogen werden können, so hat es sich an mehreren Stellen gezeigt, dass übermäßige Ablenkungen nicht zielführend sind. Als anschauliches Beispiel hierfür kann der Kreisverkehr in Pfinztal-Söllingen in Kollektiv 1.4 herangezogen werden, bei dem in der Fahrtrichtung AB ($2T = 76$ gon) auffällig viele Fahrurfälle geschehen (vgl. Unfalldiagramm in Anlage 14.8; Bild 7.8, roter Punkt rechts oben).

Für den Prüfparameter TE mit den beiden konkurrierenden Anforderungen ist zu beachten, dass der Wert im Regelfall eines vierarmigen Kreisverkehrs die Untergrenze nicht unterschreiten sollte, damit Anforderung 1) aus Kapitel 7.1 ausreichend Beachtung findet. Vor diesem Hintergrund erscheint die Festlegung der Untergrenze von $TE = 3,0$ gon sinnvoll. Im Vergleich mit Bild 14.47 (siehe Anlage 14.14) zeigt sich für die Fahrurfälle anhand der vier zugrundeliegenden Beispiele, dass an jeder Zufahrt mit negativem TE Fahrurfälle auftreten. Ein negativer Wert für TE ist also grundsätzlich zu vermeiden. Für den Bereich dazwischen (TE zwischen 0 und 3 gon) kann keine fundierte Aussage getroffen werden, ob diese Werte einen noch „brauchbaren“ Bereich darstellen können, sofern der zugehörige Wert von 2T im sehr guten

Bereich liegen sollte. Gemäß Bild 7.8 liegen im Bereich TE zwischen 0 und 3 gon nur sehr wenige Werte, von denen allerdings die meisten eine $UR > 0$ aufweisen.

Der Abgleich mit den unterschiedlichen Kombinationen in Bild 8.1 liefert dafür einen interessanten Aspekt: TE-Werte unter 3 gon können fast ausschließlich dann erreicht werden, wenn sehr große Außendurchmesser über 40 m vorliegen. Der 2T-Wert liegt – separat betrachtet – bei regelmäßigen Anlagen mit derart großen Außendurchmessern tlw. im brauchbaren, aber überwiegend im sehr guten Wertebereich. Eine fundierte Aussage, ob bei sehr großen Anlagen der sehr gute Wertebereich für TE vergrößert oder ob durch entwurfstechnische Anpassungen im Zufahrtsbereich TE entsprechend den Anforderungen erhöht werden kann, ohne dass 2T den sehr guten Wertebereich verlässt (z.B. durch Variation von B_z oder R_z), bleibt weiteren Forschungen vorbehalten. Daher werden im Rahmen dieser Überlegungen als „konservative Annahme“ Unterschreitungen von TE vorbehaltlich weiterer Erkenntnisse nicht als brauchbar angesehen, insbesondere da sie für regelmäßige Kreisverkehre mit Außendurchmessern unter 40 m quasi nicht darstellbar sind.

Der obere Grenzwert von TE (8 gon) ist dahingehend weniger kritisch zu sehen, zumal bspw. in Bild 7.8 oberhalb des hervorgehobenen Empfehlungsfeldes keine schweren Unfallfolgen (rotbraune oder lila Punkte) zu verzeichnen sind. Zwar lässt dies Überschreitungen der Obergrenze von TE tolerierbar erscheinen, sofern ein 2T-Wert im sehr guten Bereich erreicht werden kann. Allerdings zeigt Bild 8.1, dass TE-Werte in dieser Größenordnung nur schwerlich mit geeigneten Werten für 2T gekoppelt umsetzbar sind, weshalb hier keine dezidierte Empfehlung notwendig erscheint. Sehr wichtig hingegen ist, dass der Grenzwert für TE dann nicht nach oben überschritten werden darf, wenn 2T unterhalb des „sehr guten“ Bereichs liegt (vgl. Kapitel 7.4.4). Insgesamt erscheint es naheliegend, dass nur einer der beiden Werte in einem lediglich „brauchbaren“ Bereich liegen sollte, der andere sollte dann stets einen „sehr guten“ Wert aufweisen. Das Ergebnis dieser Überlegungen ist anschaulich in Bild 8.2 dargestellt.

8.2.3 Kreisverkehre mit variablen Achsanordnungen

Vorüberlegungen

Es ist in der Praxis nicht immer als gegeben vorauszusetzen, dass ein Kreisverkehr im Zuge zweier sich rechtwinklig in einem Punkt kreuzender, gerader Straßen liegt. Oft liegt bei Kreisverkehren „natürlicherweise“ eine unsymmetrische Winkelverteilung bzw. ein gewisser Versatz zwischen den Zufahrten vor, der vielfältige Formen annehmen kann. Ein solcher Versatz kann jedoch auch gezielt konstruiert werden. Denkbar ist, dass sich die Achsen zwar in einem Punkt schneiden, aber unterschiedliche Winkel zueinander aufweisen, oder dass sowohl bei rechtwinklig als auch bei stumpf- oder spitzwinklig aufeinandertreffenden Achsen diese mehrere Schnittpunkte aufweisen können.

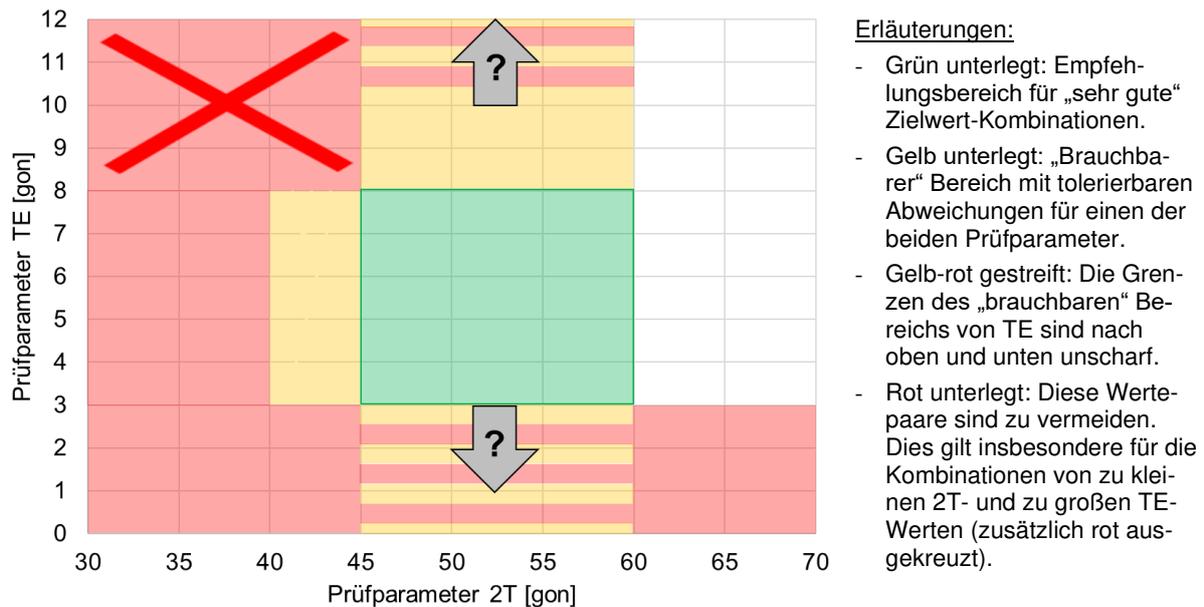


Bild 8.2: Empfehlenswerte, brauchbare und zu vermeidende Größenordnungen für die Prüfparameter TE und 2T

Variationen der Achsanordnungen

Insgesamt wurden verschiedene Varianten für Achsanordnungen überprüft, zunächst unter der Vorgabe, dass der Kreisverkehr punktsymmetrisch zum Mittelpunkt aufgebaut ist, um für alle Zufahrten die gleichen Bedingungen und somit das gleiche Sicherheitsniveau erreichen zu können; abweichend davon wurden durchgängig einseitig versetzte Achsen betrachtet:

- 1) Durchfahrwinkel in Geradeaus-Richtung von 190, 195, 205 und 210 gon (vgl. Bild 8.3 links)
- 2) Punktsymmetrisch, links- bzw. rechtsseitig zum Kreismittelpunkt versetzte Achsen mit Versatzmaßen der Achsen von 1 bis 2 m (vgl. Bild 8.3 Mitte)
- 3) Einseitig versetzte, durchgängige Achsen mit Versatzmaßen der Achsen von 1 bis 2 m (vgl. Bild 8.3 rechts)

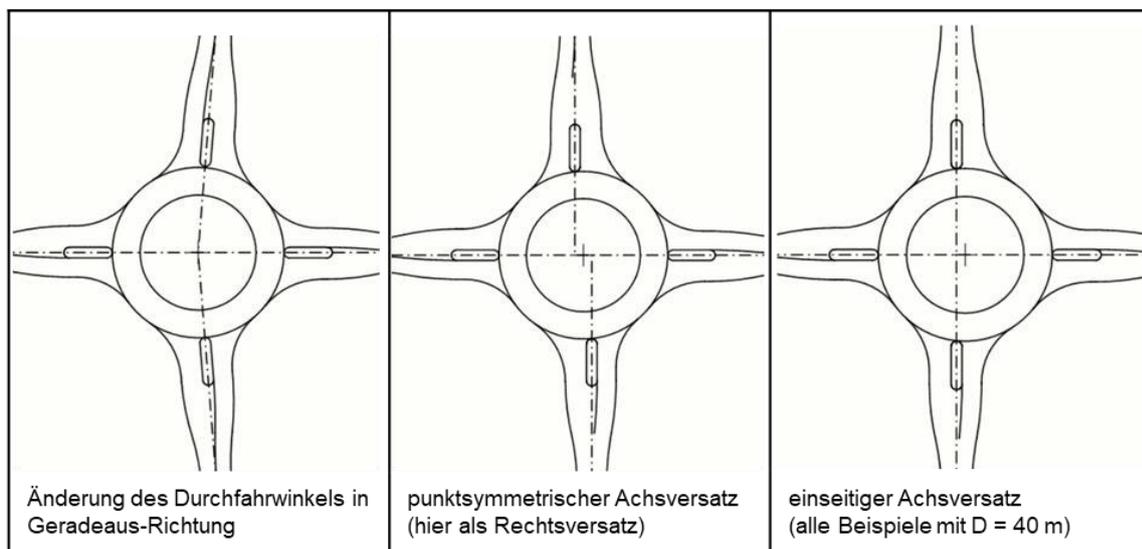


Bild 8.3: Prinzipskizzen für Kreisverkehre mit variabler Achsanordnung

Diese Variationen wurden unter Zugrundelegung der Kombination 2-2 in VESTRA nachtrassiert und die Prüfparameter TE und 2T ermittelt. Eine Übersicht über alle Variationen und die Prüfparameterwerte findet sich in Anlage 14.16. Damit wird einerseits der Einfluss von verschiedenen Achsanordnungen überprüft und andererseits ermittelt, ob eine Achsanordnung bestimmt werden kann, die gerade für Kreisverkehre mit kleinerem Außendurchmesser verbesserte Werte für die Prüfparameter hervorbringt.

Ergebnisse und Bewertung der einzelnen Variationen

In Bezug auf die einzelnen Variationen lassen sich die Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

- Zu 1): Erwartungsgemäß bleiben die TE-Winkel unbeeinflusst von diesen Maßnahmen; ebenso erwartbar ist die Verbesserung der 2T-Werte für Winkel größer 200 gon. Unter 200 gon nahmen die Werte allerdings auch im gleichen Maße ab und entfernten sich stark vom Empfehlungsbereich (vgl. Bild 14.50 in Anlage 14.16). Da für einen Kreisverkehr in allen Armen mindestens gleich gute Bedingungen vorherrschen sollen (und Durchfahrten mit 210 gon in der einen Fahrtrichtung für die Gegenrichtung Durchfahrten mit 190 gon bewirken), ist der Ansatz für vierarmige Kreisverkehre nicht geeignet.
- Zu 2): Ein punktsymmetrischer Achsversatz erbrachte für Versätze nach links (die Achse wird aus der ursprünglichen Lage nach links versetzt, die Ursprungsachse liegt also rechts der neuen Achse = Linksversatz und umgekehrt) fast identische Werte wie für die Ausgangssituation ohne Versatz. Bei den Rechtsversätzen sind die Werte etwas differenzierter, aber immer noch sehr ähnlich. Insgesamt ergeben sich für diese Anordnung die geringsten Abweichungen von der Ausgangssituation, aber auch die geringsten Schnittmengen mit dem „Empfehlungsfeld“ (vgl. jeweils Bild 14.51 in Anlage 14.16).
- Zu 3): Durch den einseitigen Achsenversatz entsteht aus Sicht eines der Zufahrenden ein „Bauch“ durch die Kreisinsel (vgl. z.B. vgl. Bild 8.3 rechts, bei Fahrt von „unten“ nach „oben“). Dieser Bauch trägt bei kleineren Außendurchmessern in nicht unerheblichem Maß zur Verbesserung der 2T-Werte auf den betreffenden Relationen bei. Insbesondere bei einem Versatz von 2,0 m können schon für Kreisverkehre mit einem Außendurchmesser von D unter 40 m sehr gute Wertekombinationen erreicht werden. Für einen Linksversatz aus Sicht der Zufahrenden gilt allerdings entsprechend das Gegenteil (vgl. jeweils Bild 14.52 in Anlage 14.16).

Darüber hinaus wurden auch folgende Konstellationen untersucht, aber nicht weiterverfolgt:

- 4) Punktsymmetrisch, links- bzw. rechtsseitig zum Kreismittelpunkt versetzte Achsen mit gleichzeitiger Achsverdrehung (Versatzmaße der Achsen von 1 bis 2 m, Winkel von 5 und 10 gon),

- 5) aus Sicht beider Zufahrten asymmetrisch, beidseitig, links- bzw. rechtsseitig zum Kreis-
mittelpunkt versetzte, rechtwinklig zueinanderstehende Achsen (mit Versatzmaßen der
Achsen von 1 und 2 m),
- 6) ein insgesamt asymmetrischer Versatz nur einer Achse, während die gegenüberlie-
gende Achse in den Mittelpunkt führt, und umgekehrt (auch hier mit Versatzmaßen der
Achsen von 1 bzw. 2 m).

Für Konstellation 4) zeigt sich, dass die Prüfparameterwerte für alle Varianten vergleichsweise robust sind und keine maßgeblichen Verbesserungen erreicht werden. Bei den asymmetrischen Links- bzw. Rechtsversätze 5) und 6) treten Kombinationen auf, bei denen bestimmte Werte-Kombinationen von 2T und TE zwar das „Empfehlungsfeld“ der sehr guten Zielwertkombinationen erreichen, jedoch ist – aufgrund der Asymmetrie des gesamten Kreisverkehrs – das jeweils entgegengesetzte Wertepaar besonders weit vom Empfehlungsfeld entfernt, was als Ergebnis wenig überrascht. Ein gezielter Einsatz solcher asymmetrischen Kombinationen ist also zumindest für vierarmige Kreisverkehre insgesamt ungeeignet.

Fazit und Ableiten von Gestaltungshinweisen

Für kleinere Außendurchmesser am Beispiel von $D = 35$ m zeigt sich, dass – unabhängig von der gewählten Achsanordnung – keine „brauchbaren“ oder „sehr guten“ Ergebnisse für 2T erreicht werden können (bei $D = 35$ m liegt 2T immer unter 40 gon, der Ausgangswert für die Regelgestaltung mit der Bezeichnung „2-2-0-0“ ist 26 gon). Der Wert für TE liegt i.d.R. am oberen Rand des Empfehlungsfeldes zwischen 7 und 8 gon, manchmal bis 9 gon. Jedoch ist zu beachten, dass eine „Verbesserung“ von 2T in einer Fahrtrichtung im Regelfall mit einer Verschlechterung in der entgegengesetzten Richtung „erkauft“ wird, wie es z.B. bei den einseitigen Versätzen oder den variierenden Winkeln nicht anders umsetzbar ist. Es wird also grundsätzlich empfohlen, vierarmige Kreisverkehre so symmetrisch wie möglich auszubilden.

Jedoch konnte infolge der Untersuchung mit variierenden Achsanordnungen auch ein positiver Aspekt verifiziert werden: Für punktsymmetrische Anordnungen sich gegenüberliegender Arme stellt sich ein Kreisverkehr nachgewiesenermaßen als sehr robust heraus, da die Prüfparameter TE und 2T in solchen Fällen nur sehr geringe Schwankungsbreiten aufweisen. Zwangspunkte an einer Zufahrt, die sich auf die Prüfparameter auswirken würden, können somit über eine entsprechende zum Mittelpunkt des Kreisverkehrs punktsymmetrische Gestaltung der gegenüberliegenden Zufahrt ausgeglichen werden. So können zumindest sehr schlechte Prüfparameter in einzelnen Fahrtrichtungen vermieden werden.

In Bild 8.1 ist erkennbar, dass die Verlaufskurve der überlagerten Werte von TE und 2T für Kreisverkehre mit Kombination 2-2 das „Empfehlungsfeld“ nur in einer Ecke berührt. Die Einzelauswertung der Prüfparameter zeigt, dass dies auf Kreisverkehre mit Außendurchmessern

von D = 44 bzw. 45 m explizit zutrifft, die „sehr gute“ Wertekombinationen erzielen. Kreisverkehre mit Außendurchmessern von D = 41 bis 43 m erreichen jeweils einen „sehr guten“ (TE) und einen „brauchbaren“ Prüfparameterwert (2T liegt dann zwischen 40 und 45 gon). Tabelle 8.3 stellt die erreichbaren Prüfparameterwerte in Abhängigkeit vom Außendurchmesser dar und veranschaulicht auf dieser Grundlage Einsatzempfehlungen für regelmäßig gestaltete, vierarmige Kreisverkehre anhand der farblich unterlegten Felder. Hier wie im Folgenden auch sind die ermittelten Werte der Prüfparameter auf eine Nachkommastelle gerundet.

| Prüfparameter-Werte für regelmäßige vierarmige Kreisverkehre → Für Kombination 2-2 der Parameter R_z bzw. R_A sowie B_z bzw. B_A . Legende der Farbuordnungen: Grün: Beide Werte sehr gut (vollumfänglich geeignet) Gelb: Ein Wert sehr gut, ein Wert brauchbar (noch geeignet) Rot: Mindestens ein Wert außerhalb des brauchbaren Bereichs (zu vermeiden) | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| D [m] | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 |
| Kombination | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 |
| TE [gon] | 5,7 | 4,9 | 4,6 | 4,2 | 3,8 | 3,5 | 3,1 | 2,7 |
| 2T [gon] | 36,6 | 39,1 | 40,9 | 42,8 | 44,4 | 46,2 | 48,0 | 49,5 |
| Empfehlung anhand der Prüfparameter | | | | | | | | |

Tabelle 8.3: Erreichbare Prüfparameter für regelmäßige vierarmige Kreisverkehre

8.2.4 Besondere Konstruktionsansätze bei vierarmigen Kreisverkehren

Vorüberlegungen

Es hat sich gezeigt, dass für vierarmige Kreisverkehre geeignete Entwurfskombinationen nur für Außendurchmesser von D = 41 bis 45 m vorliegen. Für Kreisverkehre mit D = 35 bis 40 m, die eine hohe Verbreiterung haben, sind daher zusätzliche Überlegungen angebracht, um Möglichkeiten zur Verbesserung der Prüfparameter zu erörtern. Eine solche Möglichkeit besteht in einer leicht abgewandelten Konstruktion für Kreisverkehre mit folgenden Anforderungen:

- Für kleinere Kreisverkehre soll vor allem der Wert 2T angehoben werden, gleichzeitig soll der i.d.R. bereits sehr gute TE-Wert das Empfehlungsfeld nicht verlassen.
- Die dafür notwendigen geometrischen Anpassungen sollen auf die Befahrbarkeit keinen erkennbar negativen Einfluss haben, auch wenn sich die Art, einen Kreisverkehr zu durchfahren, dadurch möglicherweise etwas ändern könnte.

Ein gesteuertes „Anheben“ des 2T-Wertes ist praktisch nur über die innere Tangente (Tangente an die Kreisinsel) umsetzbar, um die Befahrbarkeit der Zufahrt nicht zu erschweren. Zu vermeiden ist jedoch, dass die Kreisfahrbahn durch ein schlichtes Anheben des Kreisinselradius übermäßig verengt wird. Vorstellbar sind daher eher „beulenartige“ Ausbuchtungen der

Kreisinsel bzw. lokale Einbuchtungen an der Kreisfahrbahn. Übergänge in der Form sollen dabei möglichst „fließend“ gestaltet werden. Das Ergebnis dieser Überlegungen mündet – der Flächenbedarf der Anlage sollte dabei nicht maßgeblich vergrößert werden – in eine Konstruktion mit „unrunder“ Kreisinsel. Prinzipiell sind hierfür unterschiedliche Ausprägungen vorstellbar.

Entwicklung und Bewertung eines „Klothoiden-Kreisverkehrs“

In einem iterativen Verfahren wurden verschiedene „unrunde“ Kreisinselformen betrachtet. Ziel dabei war, eine kreisähnliche Form zu finden, deren Begrenzung keine abrupten Unstetigkeiten aufweist und die „umfahrbar“ ist, insbesondere um eine noch möglichst angepasste Befahrbarkeit für die sinngemäßen Linksabbieger zu erreichen. Auf Grundlage dieser Überlegungen wird eine Fläche, deren Form aus Klothoidensegmenten besteht, für weitere Untersuchungen als am besten geeignet befunden. Es wird das folgende Vorgehen gewählt, bei dem die Form der Kreisinsel und der äußere Rand der Kreisfahrbahn identische konstruiert werden:

- Die Form ist aus acht gleichen Klothoidensegmenten zusammengesetzt.
- Jedes Klothoidensegment beginnt bei $R = \infty$ und endet, wenn eine Richtungsänderung von 50 gon im Vergleich zum Ausgangspunkt erreicht wurde. Alle Segmente werden jeweils an den Ausgangspunkten A_i bzw. den Endpunkten E_i miteinander verbunden, sodass ein geschlossener Körper entsteht (vgl. Bild 8.4). Dieser Körper wird so skaliert, dass die Länge der Geraden $G_{A_1-A_3}$ bzw. $G_{A_2-A_4}$ (Verbindungen der Punkte A_1 und A_3 bzw. A_2 und A_4) jeweils dem Radius der ursprünglichen Kreisinsel entspricht. Mit dem Außenkreis des Kreisverkehrs wird entsprechend verfahren.

Werden die Geraden $G_{A_1-A_3}$ bzw. $G_{A_2-A_4}$ so ausgerichtet, dass sie um 50 gon versetzt zu den Zufahrtsachsen sind, entsteht eine Konstruktion ohne zusätzlichen Platzbedarf, lediglich die Fahrbahnteiler und der dahinterliegende Teil der Zufahrten müssen entsprechend ca. 2 bis 3 m zurückversetzt werden, während die Ausrundungen in die Klothoidenform übergehen und

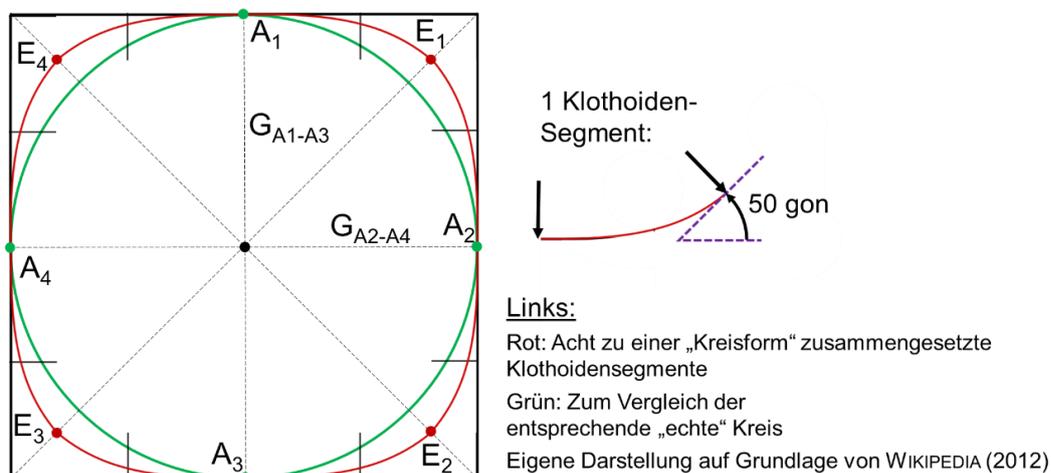
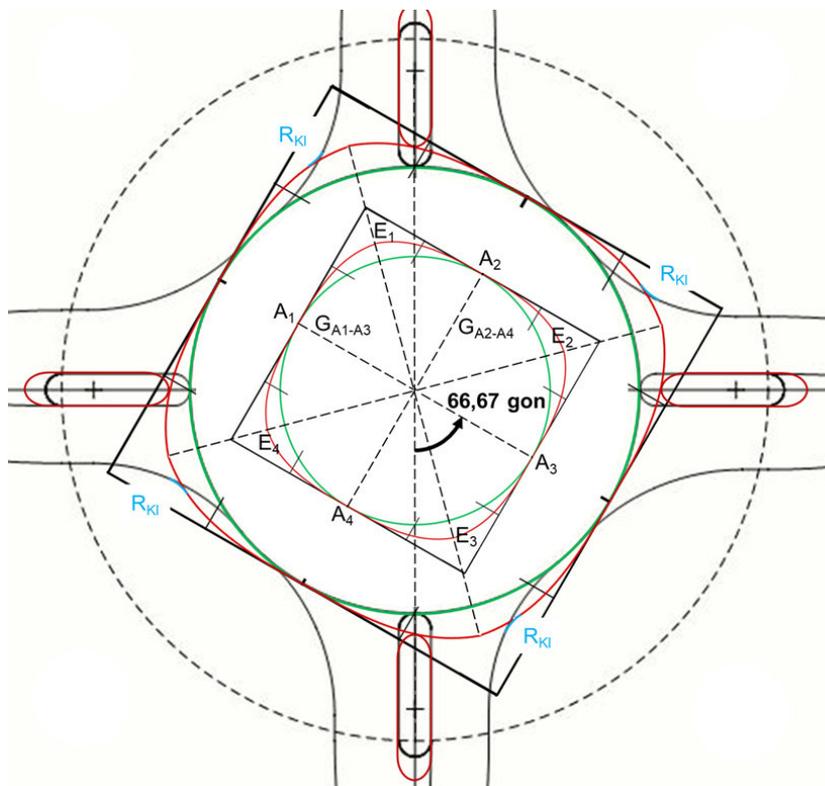


Bild 8.4: Prinzipskizze zur Zusammensetzung des Kreisinselkörpers aus acht Klothoidensegmenten

belassen werden können. Diese Grundform eines „Klothoiden-Kreisverkehrs“ ist in Bild 14.53 in Anlage 14.17 dargestellt. Die dabei entstehenden Werte für die Prüfparameter im Vergleich zu einem echten Kreisverkehr sind in der gleichen Anlage in Tabelle 14.21 bzw. Bild 14.54 aufgeführt. Mit dieser Anordnung wird das Ziel, jeweils zumindest einen „sehr guten und einen „brauchbaren“ Prüfparameterwert zu erlangen, nicht erreicht.

Eine Verbesserung insbesondere des TE-Werte kann jedoch erreicht werden, wenn – abweichend von der Grundform der „Klothoiden-Insel“ – die Diagonalen G_{A1-A3} bzw. G_{A2-A4} zu den Zufahrtsachsen verdreht ausgerichtet werden. Auf diese Weise wird vor allem der erreichbare Wert des Prüfparameter 2T ausgereizt. Eine solche Verdrehung ist bspw. um 33,33 bzw. 66,67 gon möglich, sodass die Spitzen der Insel (Endpunkte E_i) jeweils den Zufahrten gegenüberliegen (vgl. Bild 8.5). Bei dieser Konstruktion entsteht etwas zusätzlicher Platzbedarf im Bereich der Fahrbahnen zwischen Zu- und Ausfahrt. Die äußeren Fahrbahnränder an den Zu- und Ausfahrten sind hier an die Klothoidenform der Fahrbahn anzupassen (zusätzlicher Ausrundungsparameter R_{KI}). Voraussetzung ist, dass die erforderlichen Ausrundungen R_{KI} am rechten Fahrbahnrand zwischen Zufahrtsausrundung und den klothoidenförmigen Kreisfahrbahn-rändern so klein ausgeführt werden, dass die ursprünglichen Fahrbahn-ränder Bezugslinien für die Ermittlung der Prüfparameter bleiben (eine Befahrbarkeit wäre gesondert zu prüfen). Die resultierenden Einzelwerte für die Prüfparameter bei einem „gedrehten Klothoiden-Kreisverkehr“ enthält Tabelle 8.4. Die grafische Gegenüberstellung von TE und 2T des „gedrehten Klothoiden-Kreisverkehrs“ mit denen eines „echten“ Kreisverkehrs zeigt Bild 8.6, wobei



Erläuterungen:

- Verdrehung der Diagonalen um 66,67 gon zur Zufahrtsachse.
- Die relevanten Konstruktionspunkte sind am Beispiel der Kreisinsel aufgezeigt.
- Grün: „echte“ Kreisformen.
- Rot: Klothoidenformen und verschobene Fahrbahn-teiler.
- Blau: zusätzliche Ausrundungen R_{KI} .
- Schwarz gestrichelt: „10 m-Ring“ zur Ermittlung von TE (verbleibt in ursprünglicher Lage und Form).

Eigene Darstellung auf Grundlage von WIKIPEDIA (2012)

Bild 8.5: Prinzipskizze eines „gedrehten Klothoiden-Kreisverkehrs“ (66,67 gon Verdrehung zur Zufahrtsachse)

erkennbar wird, dass durch die „Klothoiden“-Insel jeweils Wertekombinationen von TE und 2T erreicht werden können, die in etwa denen von „echten“ Kreisverkehren mit einem um 2,0 m höheren Durchmesser entsprechen. Dabei werden „sehr gute“ Wertekombinationen nur knapp verfehlt. Anlagen mit D = 38 und 39 m ergeben prinzipiell brauchbare Kombinationen.

Bei allen diesen Werten der „Klothoiden-Kreisverkehre“ ist jeweils zu beachten, dass sie nicht vollumfänglich rechnergestützt ermittelt wurden. Auch wenn die Werte also etwas „grober“ sind, zeigt sich dennoch, dass die Verbesserungen der Prüfparameterwerte für kleinere Anlagen von D = 35 bis 37 m nicht ausreichend sind, um wenigstens brauchbare Wertekombinationen erreichen zu können. Für Außendurchmesser ab D = ca. 40 m und größer unterschreitet TE den Mindestwert, sie sind somit auch nicht mehr brauchbar.

Diskussion und Fazit

Für linksabbiegende oder sogar wendende Fahrzeuge ist zu erwarten, dass mehrheitlich Fahrlinien hervorgerufen werden, die sich an die Inselform anschmiegen. Dadurch ist während der Kreisdurchfahrt der Lenkwinkel stetig anzupassen bzw. zu korrigieren. Die möglichen Effekte sind durchaus ambivalent zu sehen: Einerseits können dadurch Erschwernisse bei der Befahrbarkeit und infolgedessen ggfs. Unfälle resultieren, andererseits könnte sich die dafür

| Prüfparameter-Werte für vierarmige Kreisverkehre – Sonderform: „gedrehter Klothoiden-Kreisverkehr“ (Verdrehung um 66,67 gon) | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|
| → Für Kombination 2-2 der Parameter R _z bzw. R _A sowie B _z bzw. B _A . | | | | | | |
| D [m] | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
| Kombination | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 |
| TE [gon] | 7,2 | 6,7 | 5,6 | 3,9 | 3,3 | 2,8 |
| 2T [gon] | 31,7 | 35,6 | 37,8 | 40,6 | 42,8 | 45,0 |
| Empfehlung anhand der Prüfparameter | / | / | / | / | / | / |

Tabelle 8.4: Erreichbare Prüfparameter für die Sonderform „gedrehter Klothoiden-Kreisverkehr“

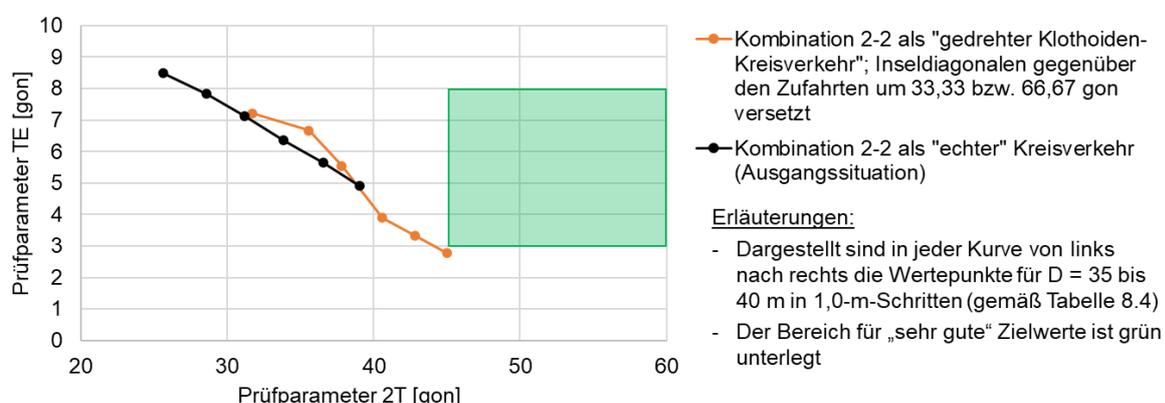


Bild 8.6: Überlagerte Werte für TE bzw. 2T für die Sonderform „gedrehter Klothoiden-Kreisverkehr“ sowie Vergleich zur Ausgangssituation

erforderliche erhöhte Aufmerksamkeit bei der Kreisdurchfahrt auch positiv auf das Unfallgeschehen auswirken. Ggfs. ist es zusätzlich erforderlich, die Befahrbarkeit der Kreisfahrbahn an sich zu überprüfen, da die Radien der Klothoiden an den Übergangspunkten E_i deutlich kleiner sind als der ursprüngliche Kreisinselradius R_i . Hieraus kann sich ein Bedarf für eine größere Kreisfahrbahnbreite ergeben, ggfs. auch nur in bestimmten Segmenten. Diese Aspekte wären vertiefend zu untersuchen.

Es kann somit festgehalten werden, dass eine grundlegende Verbesserung der 2T-Werte an kleineren, vierarmigen Anlagen planerisch nur bedingt möglich ist. Auf eine dezidierte „Einsatzempfehlung“ für „Klothoiden-Kreisverkehre“ wird daher an dieser Stelle verzichtet (vgl. Tabelle 8.4, ohne Empfehlungen bzw. farbige Hinterlegung der Empfehlungsfelder) und auf vertiefenden Untersuchungsbedarf verwiesen.

8.2.5 Empfehlungen für die Entwurfspraxis bei vierarmigen Kreisverkehren

Im Hinblick auf Sicherheitsaspekte können folgende Empfehlungen für den Entwurf von vierarmigen Kreisverkehren über die Angaben von RAL (2012) bzw. M KV (2006) hinaus aus den vorgenommenen Auswertungen abgeleitet werden:

- Grundsätzlich sind „vollsymmetrische“ Anlagen anzustreben (identische Gestaltung aller Zufahrten, Achsen alle rechtwinklig zueinander mit Schnittpunkt im Kreismittelpunkt). Liegen an einer Zufahrt Zwangsbedingungen vor, die für diese Achse bestimmte Winkel- oder Versatzmaße erfordern und eine andere Anordnung der Gesamtanlage nicht möglich ist, so können einheitliche und insgesamt i.d.R. gute Bedingungen erreicht werden, indem die „gegenüberliegende“ Achse diesen Zwangsbedingungen angepasst und punktsymmetrisch zum Mittelpunkt angelegt wird. Idealerweise sind auch die beiden anderen Achsen entsprechend auszuführen (vgl. Bild 8.3).
- Für vierarmige Außerorts-Kreisverkehre werden grundsätzlich etwas größere Anlagen empfohlen, für die mindestens brauchbare Wertekombinationen der Prüfparameter ohne besondere Eingriffe beim Entwurf erreicht werden können. Dies ist bspw. wie vorher aufgeführt bei einem Außendurchmesser von 41 m (Mindestwert) bzw. besser 44 bzw. 45 m (Vorzugsmaße) möglich (vgl. hierzu auch die Betrachtungen in Kapitel 7.4.4 und Kapitel 8.2.2). Für andere Ausrundungs- und Fahrstreifenbreitenparameter der Zu- und Ausfahrten ergeben sich möglicherweise etwas andere Außendurchmesser, bei denen brauchbare bis sehr gute Wertekombinationen der Prüfparameter resultieren. Insbesondere bei sich nicht senkrecht im Mittelpunkt treffenden Achsen der Kreisverkehrsarme kann weiterhin die Prüfung der Befahrbarkeit z.B. für Lkw/Bus-Verkehre erforderlich sein.
- Auf Grundlage der durchgeführten Abwägungen der verschiedenen Ansprüche an die Zu- und Ausfahrtparameter erscheint die Kombination 2-2 insgesamt am günstigsten. Für rechtwinklig sich im Mittelpunkt schneidende Straßenachsen der Kreisverkehrsarme sowie

für Zu- und Ausfahrtsparameter der Kombination 2-2 ergeben sich die empfehlenswerten Anlagengrößen gemäß Tabelle 8.3. Aber auch für andere Werte der Parameter „Ausrundungsradius der Zufahrt (bzw. Ausfahrt)“ R_Z bzw. R_A sowie „Breite der Zufahrt (bzw. Ausfahrt)“ B_Z bzw. B_A können anhand der Prüfparameter die jeweils geeigneten Anlagengrößen analog bestimmt werden; ebenso können umgekehrt bspw. durch vorgegebene Anlagen-Größen die dazu aus Sicherheitsgesichtspunkten günstigen Zu- und Ausfahrtsparameter bestimmt werden.

- Sehr gute Werte für beide Prüfparameter sind anzustreben; nur einer der beiden Werte sollte in einem „brauchbaren“ Bereich liegen (vgl. Bild 8.2).
- Die untersuchten „Klothoiden-Kreisverkehre“ beschreiben einen möglichen Ansatz, wie durch eine veränderte Form der Kreisfahrbahn die Prüfparameter-Werte „künstlich“ verbessert werden können. Bildlich gesprochen hat dieses Vorgehen allerdings wie jede Art des „Dopings“ auch einen Makel, denn der Einfluss solcher Änderungen auf das tatsächliche Fahrverhalten kann nicht sicher abgeschätzt werden. Um unbeabsichtigten, möglicherweise schädlichen Auswirkungen auf andere Aspekte – einem Kollateralschaden ähnlich – vorzubeugen, können diese Anlagen allein auf der hier erarbeiteten Grundlage noch nicht empfohlen werden. Es bieten sich hier aber vertiefende Untersuchungen an.

Die Trassierungsüberlegungen haben zudem gezeigt, dass ein kleinerer Ausrundungsradius in der Zufahrt R_Z bessere TE-Werte bewirkt (vgl. Bild 8.1). Gerade bei kleineren Anlagen lassen sich auf diese Weise die Werte für TE deutlich verbessern, die Werte für 2T hingegen nur sehr marginal im Vergleich zur Ausgangssituation. Es sollte vermieden werden, über kleinere Außendurchmesser eine „künstliche“ Verbesserung der TE-Werte vorzunehmen, bspw. um „sehr gute“ Prüfparameterwerte für TE zu erreichen und damit für die Umsetzung einer kleineren Anlage (D unter 40 m) zu argumentieren, und bspw. gleichzeitig den wichtigeren Parameter 2T unterhalb des brauchbaren Bereichs zu belassen.

Anmerkung: Um den Wert dieser Aussagen stützen zu können, wurde zusätzlich anhand einer Einteilung der Kreisverkehre in Größenstufen (analog zu Bild 8.1) und einer Überlagerung mit Unfallkennwerten untersucht, ob Kreisverkehre der Größenstufen KV 4 und KV 5 pauschal weniger unfallauffällig sind, da sie tendenziell näher am Empfehlungsbereich mit „sehr guten“ Werten der Prüfparameter liegen. Der Test wurde mit Kollektiv 1.2 (Unfallanzahlen, -kosten) sowie Kollektiv 1.3 (Unfallkostenraten) durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Tests sind jedoch nicht aussagekräftig: Dies wird insbesondere der Tatsache angelastet, dass an Kreisverkehren in der Praxis in Bezug zum Außendurchmesser oftmals zu große oder zu kleine – teilweise sogar gleichzeitig zu große sowie zu kleine – Konstruktionsgrößen angewendet werden (insb. Kreisfahrbahnbreiten B_K , Ausrundungsradien R_Z , Fahrbahnbreiten B_Z), die einer systematischen Einteilung, wie sie Bild 8.1 zugrunde liegt, zuwiderläuft.

8.3 Weiterführende Überlegungen zu dreiarmligen Kreisverkehren

8.3.1 Anlass

Im Rahmen der Überprüfung der vierarmigen Kreisverkehre mit variierenden Achsanordnungen wurden auch nicht-punktsymmetrische, einseitige Achsversätze untersucht („einseitig außermittige Kreisinsel“, vgl. Bild 8.7, dort sind die im Folgenden verwendeten Fahrbeziehungs-Bezeichnungen eingetragen). Diese Untersuchung an den vierarmigen Kreisverkehren wurde in einem weiteren Schritt um verschiedene Versatzmaße erweitert; dabei wurde erkannt, dass in der Fahrbeziehung AB durch den dort vorliegenden einseitigen Rechtsversatz insbesondere die 2T-Werte für kleinere Kreisverkehre mit $D = 35$ m deutlich erhöht und damit verbessert werden konnten, während die Werte in der entgegengesetzten Richtung BA jeweils absanken. Gleichzeitig konnte für diese Kreisverkehre in Geradeausrichtung BA, in der sich der 2T-Wert verringerte (verschlechterte), insbesondere bei kleineren Außendurchmessern eine auffällige Erhöhung des TE-Wertes festgestellt werden (vgl. Bild 8.5).

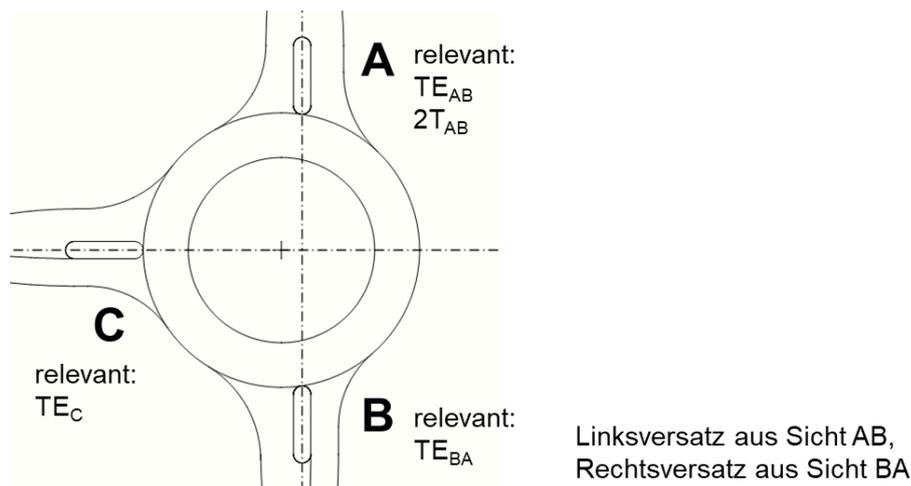


Bild 8.7: Prinzipskizze für einen dreiarmligen Kreisverkehr mit einseitigem Achsversatz mit relevanten Prüfparametern

Es ist also möglich, durch einen einseitigen Versatz den 2T-Wert für kleinere Außendurchmesser in einer Fahrtrichtung zu verbessern, allerdings zulasten des 2T-Wertes in der Gegenrichtung. Da das Prüfkriterium Winkel 2T vor allem in Bezug auf EK-Unfälle, die mit der Zufahrt im „Folge-Quadranten“ in Verbindung stehen, entwickelt wurde, entstand die Überlegung, für dreiarmlige Kreisverkehre einen absichtlichen Versatz der Kreisinsel anzulegen, seitlich von der durchgehenden Geradeaus-Fahrbeziehung in Richtung der „einmündenden“ Straße. Somit ist es unerheblich, wenn der 2T-Wert bei einem dreiarmligen Kreisverkehr in der Geradeaus-Richtung mit fehlender Zufahrt im „Folge-Quadranten“ (BA) deutlich unterhalb der Zielwerte bleibt. Hingegen wird der 2T-Wert in der relevanten Fahrtrichtung AB deutlich erhöht. Beim Prüfkriterium Winkel TE kommt im Entscheidungsmodell der Einfluss von Anforderung 3), die ebenfalls auf Grundlage der EK-Unfälle entwickelt wurde, deutlich stärker zur Geltung (vgl. Kapitel 7.4.2). Bei dreiarmligen Kreisverkehren ist diese Anforderung in der Geradeaus-Richtung BA

mit fehlender Zufahrt im „Folge-Quadranten“ nicht zu beachten, wodurch die im Entscheidungsmodell weniger stark berücksichtigte Anforderung 1) voll zur Geltung kommt: Sie fordert möglichst große TE-Werte zum Vermeiden von Fahrunfällen. Bei Kreisverkehren mit einseitigem Versatz konnte festgestellt werden, dass diese Forderung für die Fahrtrichtung BA insbesondere für kleinere Durchmesser bereits gut erfüllt ist (vgl. Bild 14.52 in Anlage 14.16.3).

Somit bietet es sich aus zwei Gründen an, für dreiarmige Kreisverkehre die entwickelten Prüfparameter angepasst an die besondere Situation zu betrachten und aufbauend auf den Erkenntnissen zu Kreisverkehren mit einseitigem Achsversatz vertiefende Untersuchungen durchzuführen. Solche einseitigen Versätze finden bereits heute Anwendung, z.B. infolge der Grundstücksverfügbarkeit. Für die hier angestellten Überlegungen ist es wichtig zu betonen, dass diese explizit für dreiarmige Kreisverkehre gelten – es muss also bei einer möglichen Anwendung in der Entwurfspraxis sichergestellt sein, dass dreiarmige Kreisverkehre auf Basis dieser Ausführungen gezielt als dreiarmige Anlagen entworfen werden (und nicht später bspw. durch Hinzufügen eines vierten Armes im unbelegten Quadranten erweitert werden – zumindest nicht, ohne die bauliche Grundform des Kreisverkehres auf die Tauglichkeit dafür zu prüfen und ggfs. umzugestalten). Die als Ergebnis dieser Betrachtungen relevanten Prüfparametergrößen an dreiarmigen Kreisverkehren zeigt Bild 8.7.

8.3.2 Besondere Konstruktionsansätze bei dreiarmigen Kreisverkehren

Vorüberlegungen

Die Grundidee besteht darin, bei dreiarmigen Kreisverkehren die Kreisinsel einseitig so zu versetzen, dass für die Fahrbeziehung BA ein möglichst großer Wert für den Winkel TE und auf der entgegengesetzten Fahrtrichtung AB gleichzeitig ein Wert für 2T entsteht, der den erarbeiteten Zielwerten möglichst entspricht. Bei der Frage, welche Versatzmaße sich in Abhängigkeit vom Außendurchmesser am besten eignen, sind folgende Aspekte zu beachten:

- Die Anforderung 1) zu Winkel TE_{BA} kennt in diesem Betrachtungsfall keine Obergrenze. Grundsätzlich wäre daher ein großes Versatzmaß vorstellbar, welches die Kreisinsel dergestalt links der Fahrlinie positioniert, dass der Kreisverkehr ohne Ablenkung befahren werden kann. Davon wird allerdings abgesehen. Vielmehr wird ein maximales Versatzmaß gewählt, welches zwar eine nur geringe Ablenkung der Fahrlinie bewirkt, aber dennoch den Kreisverkehr als solchen erkennbar lassen soll. Daher sind naheliegenderweise auch „negative“ Versatzmaße, die auf der Kreisfahrbahn eine Ablenkung der Fahrlinie nach links bewirken, grundsätzlich zu vermeiden.
- Die Zielwerte des Winkels 2T umfassen eine Ober- sowie Untergrenze. Ein zu großer Versatz zum Erreichen möglichst großer Werte für TE führt womöglich zu „übergroßen“ Werten für 2T. Auch sehr gute, aber große Versatzmaße nahe der Obergrenze sind u.U. nicht

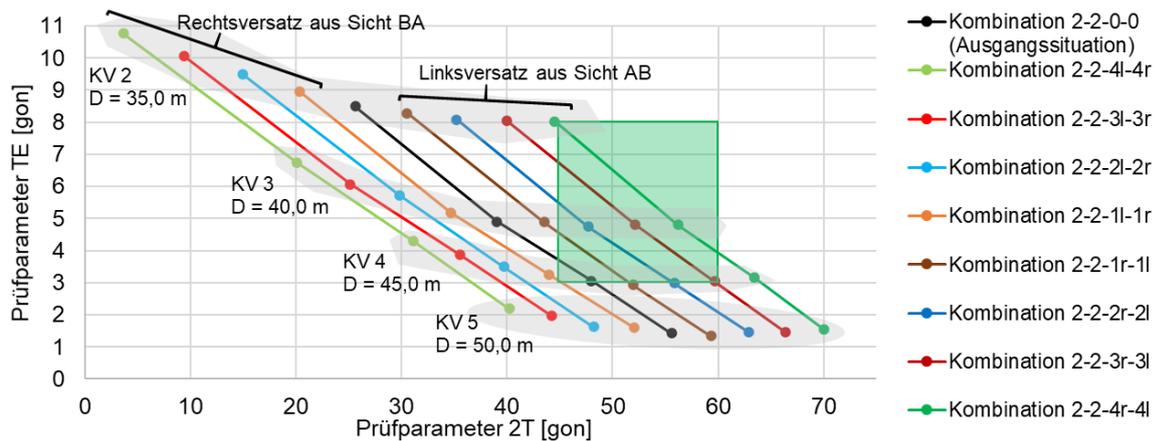
uneingeschränkt positiv zu sehen (auch wenn hierdurch die obere Grenze von 60 gon nicht überschritten wird), insbesondere dann, wenn die mit Winkel 2T im Zusammenspiel stehende Ablenkung der Fahrlinie auf einer vergleichsweise kurzen Fahrdistanz auftritt, was bei kleineren Kreisverkehren der Fall wäre (vgl. hierzu auch Kapitel 8.2.2).

- Weiterhin ist zu beachten, dass große Versatzmaße einen einseitig überdurchschnittlich großen Flächenbedarf hervorrufen, der nicht überall verwirklicht werden kann. In der Praxis ist es verbreitet, dass dreiarmige Anlagen asymmetrisch in Richtung der angebundenen Straße verschoben angelegt werden, wenn topografische Gegebenheiten (Fluss, Hanglage, etc.) es nicht anders zulassen oder weil der Flächenbedarf so einfacher umgesetzt werden kann. In der Regel entspricht zumindest die in der Praxis vorfindbare Versatzrichtung in solchen Fällen der hier überprüften Anordnung für „Kreisverkehre mit einseitigem Achsversatz“. In der Praxis zeigen sich jedoch oftmals noch andere Abweichungen oder örtliche Anpassungen, so dass keinesfalls alle bestehenden Kreisverkehre mit einer entsprechend versetzten Kreisinsel pauschal unter diese Prämissen fallen!

Ergebnisse und Bewertung der Variation der Achsanordnung

In Bild 8.8 sind für die Größenstufen KV 2 bis KV 5 die ermittelten Prüfparameterwerte für Versatzmaße bis 4,0 m eingetragen, jeweils unterschieden in den beiden Geradeaus-Richtungen. Dabei zeigt sich, dass für die Linksversätze, die jeweils die Fahrtrichtung AB abbilden, für die beide Prüfparameter relevant sind, schon bei kleineren Außendurchmessern Wertekombinationen erreicht werden können, die im sehr guten oder brauchbaren Wertebereich liegen. Daher werden in einem zweiten Schritt die erreichbaren Prüfparameter für kleinere Außendurchmesser (Größenstufen KV 2 bis KV 3) in Abhängigkeit vom Versatzmaß vertieft untersucht (vgl. Bild 8.9). Für das Versatzmaß 1,0 m wurden zusätzlich die Außendurchmesser $D = 41$ und 42 m mit untersucht. Größere Versatzmaße von 5,0 m und mehr oder für kleinere Außendurchmesser wurden nicht vertiefend untersucht, da für solche Kreisverkehre entweder TE-Werte von größer 8,0 gon beim Linksversatz aus Sicht AB zu erwarten wären. Gleiches gilt in der entgegengesetzten Fahrtrichtung beim Rechtsversatz aus Sicht BA für Werte für 2T nahe null oder im negativen Bereich, die es auch beim Rechtsversatz zu vermeiden gilt, da sie eine unübliche „negative“ Ablenkung der Fahrlinie während der Kreisdurchfahrt bewirken.

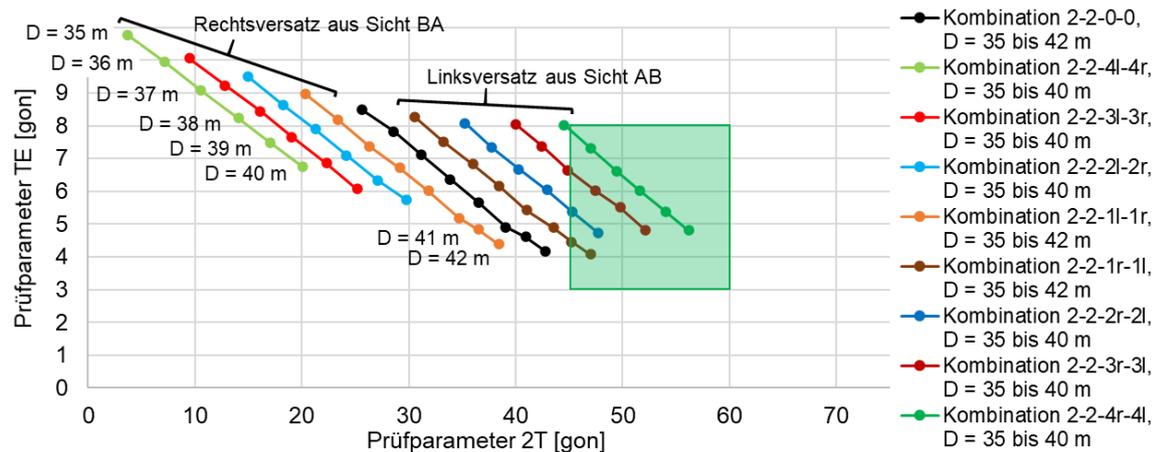
Aus Bild 8.9 ist ablesbar, dass für jeden Außendurchmesser D mindestens eine Wertekombination im sehr guten und eine im brauchbaren Bereich vorliegt. Auf Grundlage der in diesem Kapitel getätigten Vorüberlegungen soll nur jeweils das kleinste Versatzmaß, das für die entsprechende Anlagengröße sehr gute Prüfparameterwerte erzielt, weiterverwendet werden. Es soll also bspw. kein Versatz von 4,0 m bei $D = 40$ m zum Einsatz kommen, auch wenn die resultierenden Prüfparameter insgesamt sehr gut sind. Die „Konstruktion“ sehr guter Werte über den Versatz ist als Behelf anzusehen und auf das notwendige Maß zu beschränken.



Erläuterungen:

- Dargestellt ist die Kombination 2-2 der Parameter R_z bzw. R_A und B_z bzw. B_A .
- Jeweils die beiden Linien ähnlicher Farbe und im gleichen Abstand von den mittleren, schwarz eingefärbten Linie für die Werte der Ausgangssituation bilden das Wertepaar für die beiden Fahrrichtungen AB bzw. BA für ein spezifisches Versatzmaß in 1,0-m-Schritten (Beispiel: Beide blaue Linien in jeweils 2. Position von der schwarzen Linie für die Ausgangssituation aus gesehen sind die Werte bei einem Versatz von 2,0 m).
- Der Bereich für „sehr gute“ Zielwerte ist grün unterlegt.

Bild 8.8: Überlagerte Werte für TE bzw. 2T für Kreisverkehre mit einseitigem Achsversatz und Vergleich zur Ausgangssituation



Erläuterungen:

- Dargestellt ist die Kombination 2-2 der Parameter R_z bzw. R_A und B_z bzw. B_A .
- Jede Kurve zeigt von links nach rechts die Wertepunkte für $D = 35$ bis 40 m in 1,0-m-Schritten.
- Die drei mittleren Kurven zeigen zusätzlich die Werte für $D = 41$ und 42 m.
- Der Bereich für „sehr gute“ Zielwerte ist grün unterlegt.

Bild 8.9: Überlagerte Werte für TE bzw. 2T für Kreisverkehre mit einseitigem Achsversatz mit $D = 35$ bis 42 m und Vergleich zur Ausgangssituation

Fazit und Ableiten von Gestaltungshinweisen

Diese ergänzende Untersuchung hat ergeben, dass bei dreiarmligen Kreisverkehren auch für kleinere Außendurchmesser ab $D = 35$ m mit Hilfe eines „einseitigen Versatzes“ der durchgehenden Achse „sehr gute“ Ergebnisse insbesondere für 2T erreicht werden können und somit den erarbeiteten Sicherheitskriterien entsprochen werden kann. Die erreichbaren Prüfparameterwerte in Abhängigkeit von Außendurchmesser und Versatzmaß sind in Tabelle 8.5 aufgeführt und veranschaulichen in den farblich unterlegten Felder die Einsatzempfehlungen. Bild 8.10 zeigt beispielhafte Anlagen unterschiedlicher Größe mit einseitigem Achsversatzes.

| Prüfparameter-Werte für dreiarmlige Kreisverkehre mit einseitigem Achsversatz | | | | | | | | |
|---|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------|----------------------|
| → Für Kombination 2-2 der Parameter R_Z bzw. R_A sowie B_Z bzw. B_A . | | | | | | | | |
| Legende für die Farbuordnungen: | | | | | | | | |
| Grün: Beide Werte sehr gut (vollumfänglich geeignet) | | | | | | | | |
| Gelb: Ein Wert sehr gut, ein Wert brauchbar (noch geeignet) | | | | | | | | |
| D [m] | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 |
| Kombination | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 |
| Versatzmaß der durchgehenden Fahrbahnachse zum Mittelpunkt | 4,0 m | 4,0 m | 3,0 m | 3,0 m | 2,0 m | 2,0 m | 1,0 m | 1,0 m |
| TE_{AB} [gon] | 8,0 | 7,3 | 6,7 | 6,0 | 5,4 | 4,7 | 4,5 | 4,0 |
| $2T_{AB}$ [gon] | 44,5 | 47,0 | 44,9 | 47,5 | 45,3 | 47,7 | 45,2 | 47,0 |
| Empfehlung anhand der Prüfparameter | *) **) | | *) | **) | | | | **) |
| D [m] | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 |
| Kombination | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 |
| Versatzmaß der durchgehenden Fahrbahnachse zum Mittelpunkt | 3,0 m | 3,0 m | 2,0 m | 2,0 m | 1,0 m | 1,0 m | 0,0 m (kein Versatz) | 0,0 m (kein Versatz) |
| TE_{AB} [gon] | 8,1 | 7,4 | 6,7 | 6,0 | 5,4 | 4,9 | 4,6 | 4,2 |
| $2T_{AB}$ [gon] | 40,0 | 42,5 | 40,3 | 42,9 | 41,0 | 43,5 | 40,9 | 42,8 |
| Empfehlung anhand der Prüfparameter | | | | | | | | |

*) Durch Aufrunden des Wertes für $2T$ kann dies noch als „sehr gut“ angesehen werden

***) vgl. Bild 8.10

Tabelle 8.5: Erreichbare Prüfparameter für dreiarmlige Kreisverkehre mit einseitigem Achsversatz

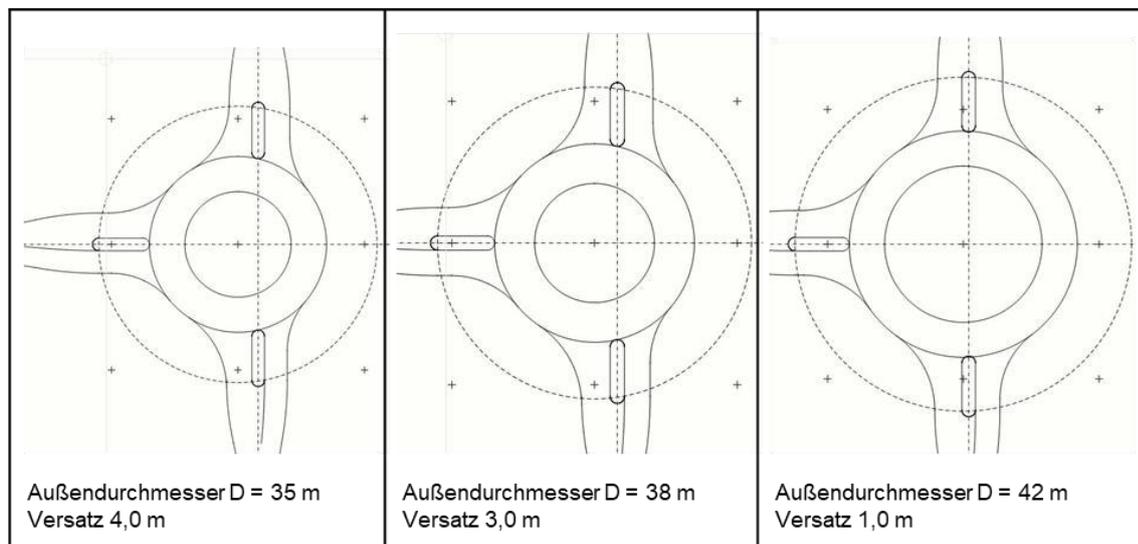


Bild 8.10: Prinzipskizzen für dreiarmlige Kreisverkehre mit einseitigem Achsversatz (Beispiele)

8.3.3 Empfehlungen für die Entwurfspraxis bei dreiarmigen Kreisverkehren

Auf Basis der vorangegangenen Auswertungen können aus Sicherheitsaspekten folgende Empfehlungen für den Entwurf von dreiarmigen Kreisverkehren über die Angaben von RAL (2012) bzw. M KV (2006) hinaus abgeleitet werden:

- Für rechtwinklige, dreiarmige Außerorts-Kreisverkehre, deren Anlagengrößen unterhalb der Empfehlungen für vierarmige Kreisverkehre liegen (Vorzugsmaße $D = 44$ bzw. 45 m, vgl. 8.2.3) wird empfohlen, solche Anlagen mit einem einseitigen Achsversatz gemäß Bild 8.7 auszubilden. Dabei soll die Achse der durchgehenden Straße in diejenige Richtung vom Kreismittelpunkt abgerückt werden, auf der sich keine Zufahrt befindet. Geeignete Versatzmaße in Abhängigkeit vom Außendurchmesser können Tabelle 8.5 entnommen werden. Für die Ausrundungs- und Fahrstreifenbreitenparameter der Zufahrten für die o.a. Außendurchmesser sind die Werte der Kombination 2-2 als günstige Kombination erarbeitet worden, weshalb sich die hier aufgeführten Beispiele daran orientieren. Andere Kombinationen sind auch hier gleichfalls möglich und können über die Prüfparameter kontrolliert werden.
- Es ist zwingend zu beachten, dass diese Anordnung mit einem einseitigen Achsversatz ausschließlich für dreiarmige Kreisverkehre geeignet ist. Wenn auch nur die Möglichkeit absehbar ist, dass die „fehlende“ Zufahrt perspektivisch nachgerüstet werden könnte, werden ausdrücklich andere Anlagen empfohlen.
- Da die Anlagen bis auf den Versatz grundsätzlich den Richtlinien entsprechen, sind keine Anhaltspunkte zu erwarten, um darüber hinausgehende Einschränkungen für den Einsatz zu geben – unter der Maßgabe, dass ein Erreichen einer sehr guten oder wenigstens brauchbaren Wertekombination der Prüfparameter TE und 2T auf anderem Wege nicht möglich ist, bspw. durch die Wahl eines größeren Außendurchmessers.

9 Fazit und Ausblick

9.1 Zusammenfassung der Untersuchungsmethoden

9.1.1 Allgemeines

In dieser Arbeit wurden Kreisverkehre hinsichtlich ihrer Verkehrssicherheit mit verschiedenen Methoden untersucht. Eingang in die Untersuchung fanden Geometrie- und Unfalldaten sowie Daten zum Verkehrsverhalten. Dabei wurde in jedem der aufeinander aufbauenden Verfahrensschritte der Umfang des Untersuchungskollektivs reduziert und die Untersuchungstiefe erweitert (vgl. Bild 9.1). Diese Vorgehensweise manifestiert sich auch in den verschiedenen, je Verfahrensschritt gewonnenen Erkenntnissen.



Bild 9.1: Übersicht über die Untersuchungsschritte

9.1.2 Analyse der Entwurfsgeometrie

Als erster Schritt wurde an einem großen Kollektiv eine Analyse der Geometrie von 137 Kreisverkehren vorgenommen. Diese Analyse erbrachte, dass gerade im Bereich der Zufahrten vielfach (zu) großzügige Entwurfselemente gewählt werden. Die gängigen Unterscheidungsmerkmale von „radialen“ bzw. „tangentialen“ Zufahrten lassen sich nicht auf einzelne Entwurfsparameter zurückführen. Insgesamt besteht eine sehr große Gestaltungsvielfalt.

9.1.3 Zufahrtsgenaue Unfallanalyse mit DTV-Bezug

Bei der Analyse der Unfalldaten wurden erste Hinweise auf Abhängigkeiten zwischen der charakteristischen Gestaltung einer jeden Zufahrt und dem dort feststellbaren Unfallgeschehen offenbart: Das Auftreten von Fahrurfällen und EK-Unfällen konzentriert sich jeweils auf einen Teil der Zufahrten, was als Hinweis auf spezifische Defizite zu werten ist.

Am kleineren Kollektiv 1.3 wurde anschließend der „Risiko-Faktor“ betrachtet: Die Unfallrate bzw. Unfallkostenrate. Es hat sich gezeigt, dass die Risiken für die beiden häufigsten Unfalltypen Fahrnfall und EK-Unfall quasi nie an denselben Zufahrten besonders hoch sind. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass das Auftreten solcher Unfälle jeweils auf unterschiedliche infrastrukturelle Randbedingungen zurückgeführt werden kann.

9.1.4 Zusammenhänge zwischen Unfallgeschehen und Entwurfsgeometrie

Die Überlagerung von Geometrie- und Unfalldaten im Rahmen der zufahrtsgenauen Unfallanalyse mit einer Regressionsbetrachtung erbrachte zwar keine statistisch belastbaren Zusammenhänge zwischen Unfällen und der Entwurfsgeometrie, jedoch konnten drei unfallbegünstigende Risiko-Entwurfs-Konstellationen herausgearbeitet werden:

- REK 1: (Sehr) geringe Kurvigkeiten der Fahrlinie am links liegenden Arm bewirken höhere Unfallraten von EK-Unfällen.
- REK 2: Zufahrten, die insgesamt eher tangential gestaltet sind, bewirken höhere Unfallkostenraten von EK-Unfällen.
- REK 3: Eher radiale Zufahrten in den Kreisverkehr mit direkt nach dem Einfahrbereich stark abgelenkten Fahrlinien bewirken eine höhere Unfallrate von Fahrnfällen.

Weiterhin wurde durch diesen Untersuchungsschritt ersichtlich, dass die drei genannten unfallbegünstigenden Situationen starke Querbezüge zum Fahrverhalten in den jeweiligen Situationen aufweisen. Dementsprechend wurde eine Methode entwickelt und angewendet, um an fünf ausgewählten Kreisverkehren das Fahrverhalten vertiefend zu untersuchen. Das Fahrverhalten in der Zufahrt stand dabei besonders im Fokus.

9.1.5 Fahrverhaltensuntersuchung

Im Rahmen der Fahrverhaltensuntersuchung konnte aufgezeigt werden, dass vor allem für das Geschwindigkeitsverhalten im Bereich der unmittelbaren Zufahrt Abhängigkeiten von bzw. Zusammenhänge mit der Geometrie bestehen. Zudem konnten Zusammenhänge von Fahrverhalten und Unfallgeschehen identifiziert werden: So führen z.B. Zufahrtsgeschwindigkeiten von über 35 km/h tendenziell zu sehr hohen Werten für EK-Unfälle (UR und UKR).

Auch insgesamt stellt es sich heraus, dass im Regelfall ein vergleichsweise niedriges Geschwindigkeitsniveau im Bereich der Zufahrt und direkt danach im anschließenden Abschnitt auf der Kreisfahrbahn für ein hohes Sicherheitsniveau förderlich ist.

Grundlegend ergab sich die Erkenntnis, dass gerade dort, wo ein steuerndes Einwirken über die Entwurfsgrößen auf das Fahrverhalten den größten Nutzen für die Sicherheit hat – nämlich im Bereich der Zufahrt – eine recht große Vielfalt an Entwurfsmöglichkeiten und -freiheiten

besteht und in der Folge die Entwurfparameter der Anlagen in der Praxis vielfach (zu) großzügig gewählt sind.

9.1.6 Herleiten der Prüfparameter TE und 2T

Aufbauend auf diesen Untersuchungsergebnissen wurden zwei Prüfparameter entwickelt, mit denen bewertet werden kann, ob in zwei relevanten Bereichen des Kreisverkehrs die dortige entwurfsgeometrische Konstellation ein aus sicherheitstechnischer Sicht geeignetes Fahrverhalten bewirkt:

- Prüfparameter TE im Bereich der Einfahrt
- Prüfparameter 2T im Bereich der Kreisfahrbahn

Als Prüfparameter wurde jeweils ein Winkel gewählt, um die Einflüsse der umgebenden Entwurfparameter möglichst integriert abbilden zu können (vgl. Bild 9.2).

Prüfparameter TE beschreibt den Winkel zweier Tangenten, die beide den Ursprung in der Mitte der Fahrbahn der Zufahrt in 10 m Abstand zum Außenradius haben. Diese Tangenten schmiegen sich an den Ausrundungsradius der Zufahrt R_Z bzw. an die Kreisinsel an. Auch der Winkel 2T wird über zwei Tangenten konstruiert. Beide Tangenten schmiegen sich jeweils an einem Ende an den Ausrundungsradius der Zufahrt R_Z bzw. Ausrundungsradius der Ausfahrt R_A sowie in beiden Fällen an die Kreisinsel an. Zu jeder Tangente wird eine Senkrechte konstruiert; der Schnittwinkel dieser beiden Senkrechten ist der Winkel 2T (Gegenwinkel zum Tangentenwinkel). Eine prinzipielle Eignung der beiden Prüfparameter wurde sowohl anhand von Fahrverhaltensparametern als auch anhand von Entwurfparametern festgestellt.

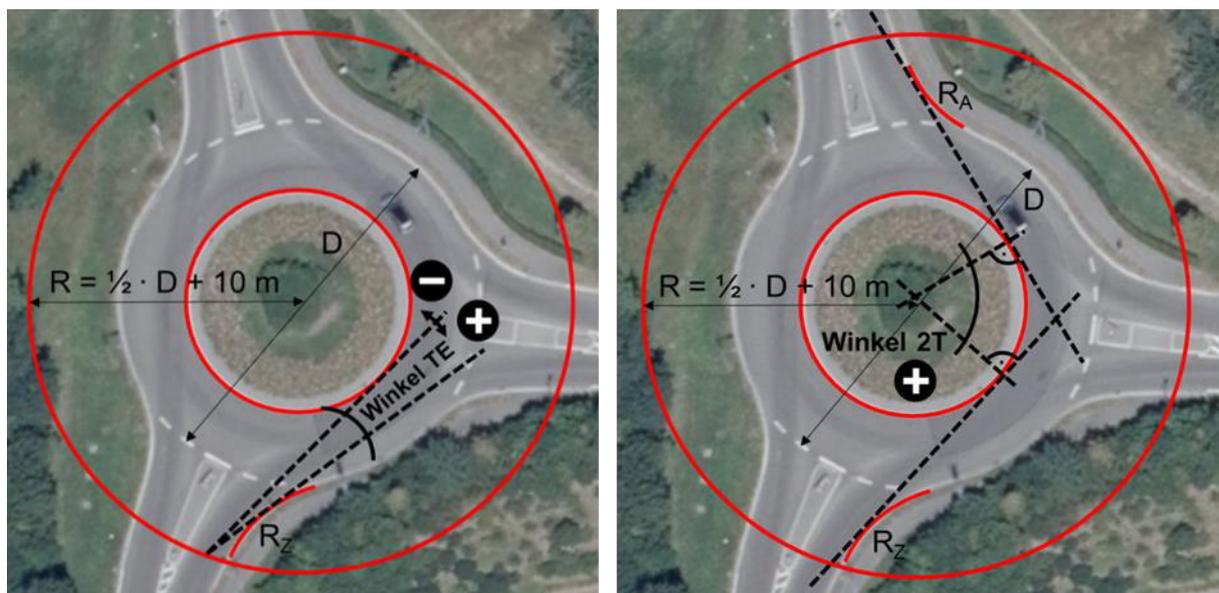


Foto-Grundlage jeweils: LUBW-Online-Kartendienst, 2019

Bild 9.2: Konstruktionsskizzen für die Prüfparameter TE (links) und 2T (rechts)

9.1.7 Aufstellen und Überprüfen von Anforderungen an die Prüfparameter

Um einen abgesicherten Bewertungshintergrund zu erhalten, wurden die beiden Prüfparameter TE und 2T mit Hilfe einer wahrscheinlichkeitsbasierten Risikobetrachtung validiert: Es ergab sich für TE ein Mindestwert von 3 gon und ein Maximalwert von 8 gon; die Untergrenze für 2T beträgt 45 gon und die Obergrenze 60 gon. Werden diese Werte an allen Zufahrten eingehalten, so kann auf der Grundlage der hier vorgenommenen Untersuchungen davon ausgegangen werden, dass ein hohes Sicherheitsniveau für den Kreisverkehr insgesamt – insbesondere in Bezug auf die häufigsten Unfalltypen Fahrnunfall und EK-Unfall – gegeben ist. Abschließend wurden für die Prüfparameter hinsichtlich eines praxistauglichen Einsatzes Empfehlungen, die mit dem geltenden Entwurfsregelwerk abgestimmt sind, ausgesprochen.

9.2 Empfehlungen für den Entwurf verkehrssicherer Kreisverkehre

9.2.1 Allgemeines

Für alle hier ausgesprochenen Empfehlungen bilden die beiden Prüfparameter TE und 2T die Grundlage; sofern keine konkreten Maße genannt sind, sind die Empfehlungen so formuliert, dass ein Erreichen von „sehr guten“ oder „brauchbaren“ Werten der Prüfparameter befördert bzw. grundsätzlich ermöglicht wird. Teilweise wurden über die konkreten Untersuchungen zu den Prüfparametern hinaus im Rahmen dieser Arbeit weitere Erkenntnisse zur Gestaltung von Kreisverkehren gewonnen; diese sind ebenfalls in den folgenden Empfehlungen enthalten. Die Empfehlungen sind untereinander als gleichwertig und notwendig anzusehen. Nur bei einer umfassenden Umsetzung aller Empfehlungen ist gewährleistet, dass „sehr gute“ oder „brauchbare“ Werte für beide Prüfparameter an allen Zufahrten überhaupt erreicht werden können. Es ist besonders darauf zu achten, dass nicht – weder zufällig noch durch bewusste entwurfs-technische „Kniffe“ – an einzelnen Zufahrten oder für einen der beiden Prüfparameter sehr gute Werte erreicht werden, während der andere Wert darbt. Im Sinne der Standardisierung und Begreifbarkeit von Verkehrsanlagen ist erstrebenswert, an jedem Kreisverkehr ein einheitliches, sich unterbewusst bzw. automatisch einstellendes Fahrverhalten zu erreichen, da grundsätzlich bekannt ist, wie Kreisverkehre gut und geeignet befahren werden können. Daneben ist den Entwurfsanforderungen Erkennbarkeit, Übersichtlichkeit, Begreifbarkeit und Befahrbarkeit Rechnung zu tragen.

Die im Folgenden dargelegten Entwurfsempfehlungen setzen sich aus mehreren Bausteinen zusammen. Nach grundlegenden Empfehlungen kann in einem ersten Schritt zwischen einem geführten und einem freien Entwurfsvorgang gewählt werden. In einem zweiten Schritt sind für den geführten Entwurf die einzuhaltenden Kriterien für einen drei- bzw. vierarmigen Kreisverkehr abgebildet; für den freien Entwurf werden keine gesonderten Kriterien definiert, sondern es können die Vorgaben für den geführten Entwurf als Orientierungswerte genutzt werden.

9.2.2 Empfehlungen zu den Entwurfsgrundlagen

Die Grundlagen sind weniger als Empfehlung, sondern vielmehr als feststehende Gebote anzusehen, von denen auch nicht im Ausnahmefall abgewichen werden darf:

- Kreisverkehre außerorts weisen entweder drei oder vier Zufahrten (Arme) auf.
- Kreisverkehre außerorts weisen grundsätzlich keinen (baulichen oder abmarkierten) überfahrbaren Innenring auf.
- Im Regelfall weist die Kreisfahrbahn einen konstanten Radius auf (Ausnahme: vierarmige „Klothoiden-Kreisverkehre“, vgl. Kapitel 9.2.5).

Da der Kreisverkehrsentswurf nicht ausschließlich im Hinblick auf Fahrurfälle optimiert werden konnte (vgl. Kapitel 7), sind in Bezug auf weiterhin nicht ausschließbare Fahrurfälle mit einem Auffahren auf die Kreisinsel folgende Eigenschaften für eine sichere Gestaltung des Kreisverkehrs von sehr hoher Bedeutung:

- Die Kreisinsel ist grundsätzlich frei von festen Hindernissen und vorzugsweise fehlerverzeihend gestaltet (z.B. mit energieabsorbierender Oberfläche ausgestattet).
- Die Gestaltung der Fahrbahnborde und der Kreisinsel wirkt einem „Aufschanzen“ von Fahrzeugen entgegen.

9.2.3 Empfehlungen für einen geführten oder einen freien Entwurf

Empfehlungen für den geführten Entwurf

Unter einem geführten Entwurf für Kreisverkehre werden eng gefasste Entwurfsempfehlungen subsummiert, die zwar nur wenige Freiheitsgrade für planerische Abwägungen bereithalten, im Gegenzug aber mit vergleichsweise geringem Aufwand die Voraussetzungen für eine sichere Verkehrsanlage bieten. Für den geführten Entwurf sind grundsätzlich folgende Kriterien einzuhalten:

- Die Fahrbahnachsen bilden zueinander Winkel von 100 gon.
- Die Fahrbahnachsen verlaufen vor der Zufahrt gerade und werden nicht „abgekröpft“ o.ä.
- Die Fahrbahnachsen aller zuführenden Straßen schneiden sich in einem Punkt.
- Der Schnittpunkt der Fahrbahnachsen bildet den Mittelpunkt der Kreisinsel (Ausnahme: dreiarmige Kreisverkehre mit „einseitigem Achsversatz“, vgl. Kapitel 9.2.5).
- Alle Zu- und Einfahrten werden gleich gestaltet.

Dies beinhaltet insbesondere:

- o Gleiche Maße für Fahrbahnbreite bzw. Ausrundungen: Im Sinne des bestehenden Regelwerks kommen vorzugsweise „mittlere“ Werte für die Parameter R_i und B_i zum Einsatz (z.B. $R_Z = 15,0$ m; $R_A = 17,0$ m; $B_Z = 4,5$ m; $B_A = 5,0$ m).

- Gleiche Form und Größe der Fahrbahnteiler: Alle Fahrbahnteiler sind gemäß den Konstruktionsempfehlungen der RAL (2012) konstruiert.
- Auch bei untergeordneten Zufahrten ist die Anlage von Fahrbahnteilern obligat.

Dies beinhaltet *nicht*:

- Die Führung von Fuß- bzw. Radwegequerungen über den Fahrbahnteiler ist freigestellt.

Empfehlungen für den freien Entwurf

Es ist in der Praxis regelmäßig davon auszugehen, dass nicht allen Anforderungen des geführten Entwurfes umfassend entsprochen werden kann. Daher sind für einen freien Entwurf die entwickelten Grenzwerte der Prüfparameter TE und 2T an jeder Zufahrt anzuwenden. Dabei soll mindestens ein Wert im brauchbaren und ein Wert im sehr guten Bereich liegen (vgl. Bild 8.2). Bei Einhaltung ist von einem hohen Verkehrssicherheitsniveau auszugehen.

Die Anforderungen an die Prüfparameter können bei stark unregelmäßigen Anlagen oder bei Anlagen mit außermittiger, schräger oder versetzter Anordnung i.d.R. nicht eingehalten werden, womit solche Anlagen auch im freien Entwurf ausgeschlossen sein sollten. Falls in einer Zufahrt jedoch Zwangspunkte vorliegen, die eine rechtwinklige Achsausrichtung unmöglich machen, wird empfohlen, dies möglichst über eine entsprechende zum Mittelpunkt des Kreisverkehrs punktsymmetrische Gestaltung der gegenüberliegenden Zufahrt abzumildern und im Hinblick auf die Prüfparameterwerte auszugleichen. Gleichfalls ist das geltende Regelwerk zu beachten; hervorgehoben werden in Bezug auf die Gestaltung der Fahrbahnteiler die Vorgaben der RAL (2012).

9.2.4 Besondere Empfehlungen für die Anlage von vierarmigen Kreisverkehren

Beim Entwurf von vierarmigen Kreisverkehren im Rahmen eines geführten Entwurfes ist jede der folgenden Anforderungen zu beachten; beim freien Entwurf wird empfohlen, sich daran zu orientieren:

- Vierarmige Kreisverkehre sind in jedem Quadranten gleich zu gestalten. Der Mittelpunkt der Kreisinsel liegt im Schnittpunkt der Fahrbahnachsen.
- Kreisverkehre mit Außendurchmessern von $D = 44$ bzw. 45 m erfüllen die Anforderungen bezogen auf die Prüfparameter TE und 2T sehr gut. Diese Maße sind daher als Standardmaße für Außendurchmesser vierarmiger Kreisverkehre außerorts anzusetzen. Größere Außendurchmesser sind zu vermeiden und in der Praxis auch nicht erforderlich.
- Kreisverkehre mit Außendurchmessern von $D = 41$ bis 43 m erfüllen in brauchbarer Weise die Anforderungen bezogen auf die Prüfparameter. Sie können dann Anwendung finden, wenn ein Kreisverkehr mit Standard-Außendurchmesser nicht umsetzbar ist. Dabei sind die Kriterien für den geführten Entwurf besonders zu beachten (vgl. Kapitel 9.2.3).

- Kreisverkehre mit Außendurchmesser von $D = 40$ m und weniger werden auf Grundlage dieser Untersuchung nicht empfohlen. Abhilfe kann für solche derzeit noch verbreiteten, „mittlere oder kleine“ Anlagen zukünftig über besondere Konstruktionsansätze wie möglicherweise den „Klothoiden-Kreisverkehr“ erreicht werden – zumindest für Außendurchmesser von $D = 38$ bis 40 m. Da derzeit hierzu noch keine belastbaren, weiterführenden Untersuchungen und Praxis-Erprobungen vor allem hinsichtlich des Fahrverhaltens in einem unrundern Kreisverkehr vorliegen, wird vorläufig empfohlen, intensiv darauf hinzuwirken, dass bei neuen Anlagen Kreisverkehre mit Außendurchmessern von mindestens $D = 41$ m erreicht werden können. Dabei sind, auch bei Erneuerungen bestehender Anlagen, die Kriterien für den geführten Entwurf besonders zu beachten (vgl. Kapitel 9.2.3). Nach derzeitigem Kenntnisstand sind Anlagen mit $D \leq 37$ m (auch mit besonderen Konstruktionsansätzen) grundsätzlich nicht zu empfehlen.
- Empfehlenswerte Kombinationen in Abhängigkeit vom Außendurchmesser sind in Tabelle 9.1 hinterlegt.

9.2.5 Besondere Empfehlungen für die Anlage von dreiarmligen Kreisverkehren

Beim Entwurf von dreiarmligen Kreisverkehren im Rahmen eines geführten Entwurfes sind die folgenden Anforderungen im Einzelnen zu beachten; beim freien Entwurf wird empfohlen, sich daran zu orientieren:

- Kreisverkehre mit Außendurchmessern von $D = 44$ bzw. 45 m erfüllen die Anforderungen bezogen auf die Prüfparameter TE und 2T sehr gut. Diese Maße sind daher als Standardmaße für Außendurchmesser dreiarmliger Kreisverkehre außerorts anzusetzen. Der Mittelpunkt der Kreisinsel liegt im Schnittpunkt der Fahrbahnachsen. Außendurchmesser größer 45 m sind zu vermeiden und in der Praxis auch nicht erforderlich.
- Dreiarmlige Kreisverkehre mit Außendurchmessern $D = 35$ bis 43 m können die Anforderungen bezogen auf die Prüfparameter TE und 2T dann sehr gut erfüllen, wenn sie über den besonderen Konstruktionsansatz mit „einseitigem Achsversatz“ verfügen. Hierbei ist die durchgehende Fahrbahnachse nicht durch den Kreisinselmittelpunkt zu führen, sondern um ein bestimmtes Maß zu derjenigen Seite zu versetzen, bei der kein Kreisverkehrsarm anschließt (vgl. Bild 9.3). Die Größe dieses Versatzmaßes steigt mit kleiner werdendem Außendurchmesser (max. $4,0$ m bei $D = 35$ m).
- Empfehlenswerte Kombinationen für Außendurchmesser und Versatzmaße sind in Tabelle 9.1 hinterlegt.

Empfehlungen für die Anlage von Kreisverkehren auf Basis der Prüfparameter TE und 2T

→ Kombination 2-2 für Parameter „Ausrundungsradius der Zufahrt (bzw. Ausfahrt)“ R_Z bzw. R_A sowie „Breite der Zufahrt (bzw. Ausfahrt)“ B_Z bzw. B_A :
 $R_Z = 15,0 \text{ m}$; $R_A = 17,0 \text{ m}$; $B_Z = 4,5 \text{ m}$; $B_A = 5,0 \text{ m}$

Legende der Farbuordnungen:

Grün: Beide Werte sehr gut (vollumfänglich geeignet)

Gelb: Ein Wert sehr gut, ein Wert brauchbar (noch geeignet)

Rot: Mindestens ein Wert außerhalb des brauchbaren Bereichs (zu vermeiden)

| Konstruktionsansatz | Dreiarmlige Kreisverkehre | | | | | Vierarmige Kreisverkehre | |
|---------------------|---------------------------|-------------------------------|------|------|------|--------------------------|---------------------------|
| | „klassisch“ | „mit einseitigem Achsversatz“ | | | | „klassisch“ | „Klothoiden-Kreisverkehr“ |
| Achswinkel [gon] | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Versatzmaß [m] | 0,0 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 0,0 | 0,0 |
| D [m] | | | | | | | |
| 35 | Rot | Rot | Rot | Gelb | Grün | Rot | Rot |
| 36 | Rot | Rot | Rot | Gelb | Grün | Rot | Rot |
| 37 | Rot | Rot | Gelb | Grün | Rot | Rot | Rot |
| 38 | Rot | Rot | Gelb | Grün | Rot | Rot | *) |
| 39 | Rot | Gelb | Grün | Rot | Rot | Rot | *) |
| 40 | Rot | Gelb | Grün | Rot | Rot | Rot | **) |
| 41 | Gelb | Grün | Rot | Rot | Rot | Gelb | Rot |
| 42 | Gelb | Grün | Rot | Rot | Rot | Gelb | Rot |
| 43 | Gelb | Rot | Rot | Rot | Rot | Gelb | Rot |
| 44 | Grün | Rot | Rot | Rot | Rot | Grün | Rot |
| 45 | Grün | Rot | Rot | Rot | Rot | Grün | Rot |
| 46 | Rot | Rot | Rot | Rot | Rot | Rot | Rot |
| 47 | Rot | Rot | Rot | Rot | Rot | Rot | Rot |
| 48 | Rot | Rot | Rot | Rot | Rot | Rot | Rot |

*) Empfehlung unter Vorbehalt (vgl. Kapitel 8.2.4).

**) Empfehlung unter Vorbehalt (vgl. Kapitel 8.2.4) – gemäß der dortigen Bewertung wird der sehr gute Bereich zwar (knapp) verfehlt, aufgrund der „unscharfen“ Abgrenzungen (vgl. Bild 8.2) wird eine Empfehlung unter Vorbehalt hier dennoch als vertretbar erachtet.

Tabelle 9.1: Übersicht über die in dieser Arbeit entwickelten Empfehlungen für die Anlage von Kreisverkehren

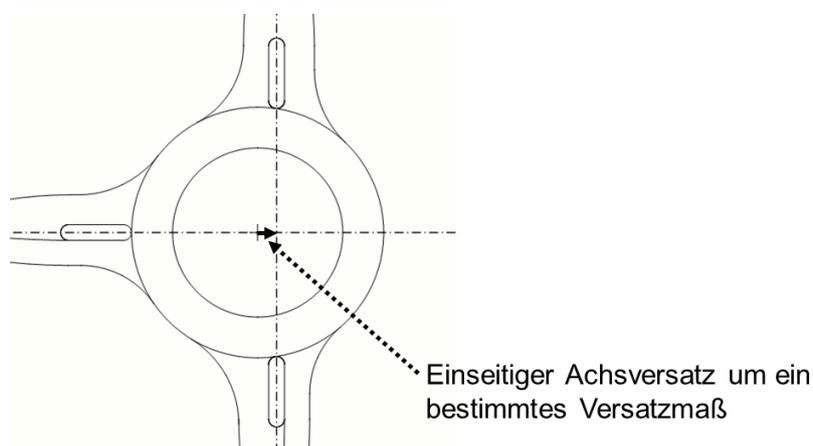


Bild 9.3: Prinzipskizze für einen dreiarmligen Kreisverkehr mit einseitigem Achsversatz

9.2.6 Weitere aktuelle Forschungsergebnisse

Parallel zur Erstellung dieser Arbeit wurde ein ähnlich gelagertes Forschungsprojekt „Auswirkungen der Erkennbarkeit und der Zufahrtgestaltung auf die Verkehrssicherheit von Kreisverkehren an Landstraßen“ durchgeführt und 2021 veröffentlicht (SCHMOTZ ET AL., 2021). Auch wenn das Thema grundsätzlich einige Überschneidungen aufweist, sind in den ausgewerteten Daten und verwendeten Methoden einige Unterschiede zu finden, die letztlich auch zu anderen Ergebnissen führen. Aufgrund des inhaltlichen Zusammenhanges sowie der zeitlichen Aktualität werden die Ergebnisse beider Arbeiten im Folgenden gegenübergestellt.

Datenstruktur und Zieldefinition der Untersuchung

SCHMOTZ ET AL. (2021) verwenden für die Unfallanalyse zunächst Daten des statistischen Bundesamtes, anschließend zum einen für eine vertiefende Datenanalyse Unfalldaten aus Hessen, Sachsen und Sachsen-Anhalt der Jahre 2016 und 2017 und zum anderen als Grundlage für eine Detailanalyse ein Kollektiv aus 109 Kreisverkehren in acht Bundesländern – darunter auch rund 20 in Baden-Württemberg (letztere beschränken sich aber auf Unfälle mit Personenschaden U(P)). Dabei wird jeweils eine dezidierte Eingrenzung auf außerörtliche Kreisverkehre vorgenommen. Die Unfalldatenkollektive weisen in Bezug zu den in dieser Arbeit verwendeten Kollektiven 1.2 bzw. 1.3 einige Übereinstimmungen, aber interessanterweise auch einige maßgebliche Unterschiede auf (vgl. jeweils Tabelle 14.23 ff. in Anlage 14.19): Zunächst erscheint die Anzahl und somit auch der Anteil der EK-Unfälle bei SCHMOTZ ET AL. durchweg sehr viel geringer als bei den in dieser Arbeit untersuchten Kollektiven, während der Anteil der Unfälle im Längsverkehr und insbesondere der Fahrnfälle hierdurch in den Unfalldaten bei SCHMOTZ ET AL. deutlich stärker präsent ist. Werden jedoch die Unfalldichten (UD) der Kollektive 1.2 in dieser Arbeit mit dem Kollektiv der Unfalldaten aus Hessen, Sachsen und Sachsen-Anhalt im Vergleich betrachtet, so zeigt sich, dass die $UD_{EK\text{-Unfälle}}$ mit 0,58 bzw. 0,54 EK-Unfällen pro Jahr und Kreisverkehr jeweils sehr ähnliche Werte aufweist (vgl. Tabelle 14.24 in Anlage 14.19); hingegen ist die $UD_{\text{Fahrnfälle}}$ und die $UD_{\text{Unfälle im Längsverkehr}}$ bei SCHMOTZ ET AL. deutlich höher. Auch wenn nur die U(P) der jeweiligen Kollektive betrachtet werden, bleibt die höhere Anzahl an Fahrnfällen bzw. Unfällen im Längsverkehr auffällig, zumal auch Kollektiv 1.1 keine maßgeblich andere Unfalltypenverteilung aufweist (vgl. Anlage 14.5 bzw. Bild 14.55 in Anlage 14.19).

Weiterhin zeigt sich bei der Detailanalyse, dass bei SCHMOTZ ET AL. die Unfallkennwerte UR und UKR – nur auf Basis der U(P) – im Vergleich zu den Werten, die in dieser Arbeit mit Unfallkollektiv 1.3 ermittelt wurden, ebenfalls stark erhöht sind – und zwar um den Faktor drei bzw. fünf. Auch im Vergleich zu Referenzuntersuchungen (ECKSTEIN UND MEEWES, 2002; SPAHN UND BÄUMLER, 2007) sind die UKR-Werte etwa um 100 % höher. SCHMOTZ ET AL. sehen

mögliche Erklärungsansätze hierfür im Bereich der verwendeten pauschalen Unfallkostensätze sowie der dezidierten Außerortslage. Außerdem kann bei SCHMOTZ ET AL. (2021) die Verkehrsstärke¹³ der untersuchten Kreisverkehre nicht nachvollzogen werden. Über mögliche Ursachen der erhöhten Anzahl der Fahrurfällen bzw. Unfälle im Längsverkehr sowie der deutlich anderen Zusammensetzung der Unfallkollektive kann somit insgesamt nur gemutmaßt werden; möglich wären neben der Lage der Kreisverkehre auch der größere Untersuchungsraum in Bezug auf Unfälle im Vorfeld der Kreisverkehre sowie in den unterschiedlichen Straßenbauverwaltungen etablierte Unterschiede im Entwurf oder Einsatz von Kreisverkehren, die sich im Unfallgeschehen niederschlagen. Möglicherweise überlagern sich auch mehrere Effekte in sich verstärkender Weise. Die vorgenannten Auffälligkeiten in ihren Unfallkollektiven bewegen SCHMOTZ ET AL. dazu, den Fokus ihrer Untersuchungen auf Fahrurfälle zu legen. Wegen der Fokussierung auf Fahrurfälle werden andere Unfalltypen – insbesondere EK-Unfälle – nur randlich betrachtet, so dass möglicherweise negative Auswirkungen einer auf die Verringerung von Fahrurfällen ausgerichteten Kreisverkehrs-Optimierung unentdeckt bleiben.

Analysen und Erkenntnisse

Im weiteren Verlauf untersuchen SCHMOTZ ET AL. Zusammenhänge zwischen Unfallkenngrößen und Entwurfsmerkmalen mittels statistischer Unfallmodelle einerseits sowie zwischen dem Geschwindigkeits- und Fahrverhalten und Entwurfsmerkmalen andererseits.

Für beide Analysen werden die Entwurfsmerkmale zumeist nicht als Einzelgrößen betrachtet, sondern geclustert bzw. qualitativ gruppiert (z.B. Fahrbahnteiler mit paralleler bzw. angepasster Bordführung oder Fahrbahnteiler in Dreiecksform; radiale oder angepasste Zufahrtsgestaltung). Nur wenige Entwurfsgrößen (wie z.B. der Winkel β_{CH}) werden einzeln betrachtet. Das Fahrverhalten wird kombiniert mittels Seitenradar- und Lasermessgeräten sowie per UAV-Befliegung erfasst. Durch die Fokussierung auf Fahrurfälle wird dabei das Fahr- und Geschwindigkeitsverhalten lediglich im Zuge der Zufahrt (ab 200 m vor dem Kreisverkehr bis zur Kreiseinfahrt) erfasst und analysiert. Die messtechnische Genauigkeit des eingesetzten Videobeobachtungsverfahrens ist als sehr hoch einzustufen.

SCHMOTZ ET AL. erkennen anhand der Unfallmodelle, dass Fahrbahnteiler mit Dreiecksform sowie breite Fahrbahnteiler – bezogen auf alle U(P) – ein niedrigeres Unfallrisiko nach sich ziehen und dass Fahrurfälle häufig bei Dunkelheit auftreten. Sie erkennen zudem ein gegenläufiges Verhalten des Unfallrisikos bei zu- bzw. abnehmenden β_{CH} -Winkeln, verfolgen diese Erkenntnis aber durch die Fokussierung auf Fahrurfälle nicht weiter. Die Untersuchung des

¹³ Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Anlagen bilden in Bezug auf die „Orientierungswerte für die Kapazität von Kreisverkehren“ gemäß M KV (2006) von 10.000 bis max. 25.000 Kfz / 24h als „Summe des zuführenden Verkehrs in allen Knotenpunktzufahrten“ (ebd.) ein aussagekräftiges Kollektiv (vgl. Bild 14.4 in Anlage 14.3).

Geschwindigkeits- und Fahrverhaltens wird gleichfalls zufahrtsbezogen vorgenommen. Auch in dieser Teiluntersuchung werden i.d.R. geclusterte oder gruppierte Entwurfsmerkmale verwendet. Es wird herausgearbeitet, dass z.B. „breite Fahrbahnteiler eine höhere Einfahrtgeschwindigkeit in den Kreisverkehr“ bewirken und dass „radiale Zufahrten langsamer befahren werden“. Entsprechende Zusammenhänge konnten auch in dieser Arbeit ermittelt werden (vgl. Kapitel 5.4.2 zur Breite von Fahrbahnteilern und Kapitel 5.4.3 zur radialen Führung). Dies zeigt auf, dass die Ergebnisse beider Arbeiten replizierbar sind, auch wenn jeweils verschiedene Datenkollektive und Auswertungsansätze verwendet wurden. Zusammenfassend spricht dies deutlich dafür, dass die Auswertungsergebnisse beider Arbeiten belastbar sind.

Auch bei SCHMOTZ ET AL. stellt sich der gewählte statistische Untersuchungsansatz als für sich gesehen vergleichsweise wenig ertragreich heraus und wird durch Fahrverhaltensanalysen sowie eine „lichttechnische Untersuchung nächtlicher Wahrnehmbarkeitsverhältnisse“ ergänzt. In Bezug auf den Entwurf von Kreisverkehren wird die Untersuchung jedoch nicht um weitere Aspekte jenseits von geometrischen Entwurfsgrößen (z.B. spezifische Charakteristika des Fahrverhaltens) vertieft, obwohl hochaufgelöste Messergebnisse vorliegen – möglicherweise liegt die Ursache hierfür auch in der Fokussierung auf Fahrunfälle im Verlauf der Zufahrt. Stattdessen wird die im Zuge der Analysen erkannte geschwindigkeitsmindernde und sicherheitserhöhende Wirkung von Kreisverkehrszufahrten, die über eine längere „Abkröpfung“ oder „Verschwenkung“ der Straße im Zulauf verfügen, hervorgehoben, wenngleich diese Aussage nur auf wenigen untersuchten Zufahrten beruht. Auf dieser Grundlage werden „Potenziale für ein sicherheitserhöhendes Entwurfsdesign“ gesehen und als Maßnahmen gegen eine schlechte Erkennbarkeit des Kreisverkehrs eine Beleuchtung, Verschwenkung oder Abkröpfung empfohlen. Eine weitere Möglichkeit wird in einem „verlängerten, aufgeweiteten Fahrbahnteiler mit drei aufeinanderfolgenden [gegenläufigen] Kurven in der Zufahrt“ gesehen; für diese Führung wird anhand von Erkenntnissen aus Australien und den Vereinigten Staaten ein Absenken der Geschwindigkeit und somit auch der Unfallanzahl erwartet (sie konnten in Deutschland jedoch nicht untersucht werden).

Die abschließenden Entwurfsempfehlungen von SCHMOTZ ET AL. (2021) unterscheiden sich von den Entwurfsempfehlungen in dieser Arbeit insbesondere in der Gestaltung der Zufahrt (vor allem bezogen auf die Form der Fahrbahnteiler) sowie im Verzicht auf dezidierte Empfehlungen, wie die Freiheiten, die das technische Regelwerk bietet, in Bezug auf einen möglichst sicheren Kreisverkehrsentwurf hin ausgerichtet werden können. Ein Mehrwert wird im Vorgehen der vorliegenden Arbeit insoweit gesehen, da mithilfe der erarbeiteten Kriterien sowohl bestehende als auch geplante Anlagen aus sicherheitstechnischer Sicht geprüft und bewertet werden können.

in Kapitel 9.4.1 werden darüber hinaus Ansätze diskutiert, in welcher Weise Erkenntnisse aus der Studie von SCHMOTZ ET AL. und aus dieser Arbeit sinnvoll kombiniert werden können.

9.3 Kritische Würdigung der eingesetzten Methoden und Verfahren

Eine zunächst durchgeführte Regressionsanalyse erbrachte zwar Indizien für die weiteren Untersuchungsschritte, jedoch wurde dabei auch deutlich, dass eine klassische Regressionsanalyse weder in Bezug auf den vorliegenden Datensatz prädestiniert ist (viele Datensätze mit Nullstellen), noch lassen sich die „Verhaltenseinflüsse“ auf das Unfallgeschehen mit Regressionskurven in Bezug zu einzelnen Geometrieelementen setzen (vgl. auch Kapitel 9.4.2). Hierfür konnte mit dem anschließend gewählten, mehrstufigen Verfahren Abhilfe gefunden werden, bei dem zwar immer wieder auf Regressionskurven als Hinweisgeber z.B. für die Qualität einer Beobachtung zurückgegriffen, jedoch die Regressionsanalyse nicht als maßgebliches Werkzeug in den Vordergrund gestellt wurde.

Seit dem Stand der Konzeption und Durchführung der Erhebungen mit dem UAV („Drohne“) hat sich die Video- und Tracking-Technik dynamisch und stetig weiterentwickelt. Mit verbesserten oder genaueren Verfahren kann es möglich werden, solche Erfassungen z.B. in einer höheren Detaillierung durchzuführen. Die zusätzliche Einbindung eines räumlichen Modells anstelle des lokalen, zweidimensionalen Koordinatensystems kann helfen, Verzerrungen der Fahrlinien z.B. durch Verrechnen mit den Höhenkoordinaten zu vermeiden. Auch ein verbessertes Erkennen von Farbunterschieden in den Videos kann das Tracking vereinfachen und genauer gestalten. Als sehr störend hat sich der Schatten bei tiefstehender Sonne herausgestellt sowie die Größenverzerrung entfernt fahrender Fahrzeuge. Wenn es rechtlich möglich ist, könnten UAV zentral über der Kreisinsel positioniert oder z.B. Fahrzeuge aktiv mit einem senkrecht darüber fliegenden UAV verfolgt werden, um solche Verzerrungen zu vermeiden.

Insgesamt wird das eingesetzte Verfahren für die durchgeführten Auswertungen als hinreichend genau eingeschätzt. Als relative Bürde und mögliche Quelle von Unschärfe wurde im Anschluss an die Erhebungen die über das gewählte Verfahren erreichbare Lagegenauigkeit der Fahrlinie in Bezug zur Anlage des Kreisverkehrs erkannt. Durch den fehlenden Höhenbezug und die dadurch entstehenden Verzerrungen kann die Lagegenauigkeit der Fahrlinie in Abhängigkeit von den verwendeten Referenzpunkten variieren; die letztendlich für die Auswertung verwendete Fahrlinie wurde anhand einer vergleichenden, qualitativen Bewertung gewählt. Von Analysen mit höherem Detaillierungsgrad, die ursprünglich ebenfalls in Erwägung gezogen wurden (wie bspw. einem Abmessen der Abstände, die die Fahrzeuge jeweils zu den Fahrbahnrandern einhalten), wurde angesichts der erreichten Lagegenauigkeit der Fahrlinien Abstand genommen.

9.4 Weiterer Forschungsbedarf

9.4.1 Allgemeiner Forschungsbedarf

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt darauf, Verbesserungen der Verkehrssicherheit von Kreisverkehren durch Maßnahmen im Bereich der unmittelbaren Zu- und der Einfahrt in den Kreisverkehr bzw. der Kreisfahrbahn zu erreichen, während die Studie von SCHMOTZ ET AL. (2021) mit der gleichen Zielsetzung schwerpunktmäßig das erweiterte Vorfeld des Kreisverkehrs betrachtet. Vor allem die dort vorgeschlagenen „verlängerten, aufgeweiteten Fahrbahnteiler mit drei aufeinanderfolgenden [gegenläufigen] Kurven in der Zufahrt“ werden für eine Verknüpfung mit den Ergebnissen dieser Arbeit als geeignet angesehen – insbesondere dann, wenn auf der freien Strecke im Vorfeld von Außerorts-Kreisverkehren ein vergleichsweise hohes Geschwindigkeitsniveau bzw. eine gestreckte Linienführung vorliegt. Die für eine sichere Befahrung des Kreisverkehrs in solchen Fällen erforderliche, starke Geschwindigkeitsminderung könnte durch eine Verknüpfung der beiden Ansätze dem Fahrzeugführer schrittweise und auf unterschiedlichen Arten vermittelt werden: Im Vorfeld zunächst durch die gegenläufigen Kurven in der Zufahrt und anschließend durch eine geschwindigkeitsdämpfende Zu- und Einfahrtsgestaltung. Es ist Aufgabe von weiteren Untersuchungen, hier sinnvolle Kombinationsmöglichkeiten zu eruieren.

Im gleichen Rahmen kann auch die Frage nach der optimalen Gestaltung des Fahrbahnteilers im unmittelbaren Zufahrtbereich, für deren finale Beantwortung anhand der Ergebnisse der beiden Arbeiten noch keine Kongruenz vorliegt, detaillierend untersucht werden – denn im Rahmen dieser Arbeit wurde ermittelt, dass die Führung des Fahrzeuges in der Kreisverkehrszufahrt besonders vorteilhaft in Bezug auf das Geschwindigkeitsverhalten ist, wenn die Fahrlinie zunächst eher radial und erst im unmittelbaren Vorfeld der Zufahrt vergleichsweise stark gekrümmt verläuft („Tangentialanteil“). Rein anschaulich wird dieses Prinzip in der Gestaltung der Fahrbahnteiler gemäß RAL (2012) umgesetzt, die daher den Empfehlungen dieser Arbeit zu Grunde gelegt wurde.

Für kleinere, dreiarmige Kreisverkehre wurde in dieser Arbeit die Alternative des sogenannten „einseitigen Achsversatzes“ entwickelt. Mit diesem Ansatz können bei Anlagen mit kleinerem Außendurchmesser die Anforderungen an TE und 2T eingehalten werden. Hierzu sollten vor einem flächendeckenden Einsatz zunächst vertiefte Untersuchungen erfolgen, z.B. über einen Praxistest an Anlagen, die diesem Gestaltungskriterium schon ganz bzw. zu sehr weiten Teilen entsprechen. Neben einer mehrjährigen Unfallanalyse ist weiterhin von Interesse, ob sich an diesen Anlagen das beabsichtigte Fahr- und Geschwindigkeitsverhalten der Fahrzeuge auch tatsächlich einstellt.

Das gleiche gilt, wenngleich auf einer anderen Ebene, für „Klothoiden-Kreisverkehre“. Dieser Ansatz wurde allgemein für vierarmige Kreisverkehre entwickelt, da nur mittels einer „unrunden“ Kreisinsel bei ansonsten gleichbleibenden Zufahrtsparemtern für Anlagen mit einem kleineren Außendurchmesser die Anforderungen an TE und 2T eingehalten werden können. Vertiefte Erkenntnisse oder Wertungen zu dem Ansatz, die Kreisinsel „unrund“ zu gestalten, um nicht nur die Prüfparameter, sondern auch das Fahrverhalten zu beeinflussen, bleiben weiteren Untersuchungen vorbehalten. Grundsätzlich ist hierbei zu beachten, dass allgemein Kreisverkehre mit „unrunder“ Insel als unfallträchtig gelten (vgl. Kapitel 2.3.4). In aller Regel beziehen sich diese Aussagen jedoch auf „ovale“ Kreisverkehre (GAMBARD UND ALPHAND, 1991). Es ist daher bei diesem Ansatz – wie auch bei allen darüber hinaus denkbaren Ansätzen, die von der eigentlich „runden“ Kreisinsel abweichen – in jedem Fall zu gewährleisten, dass dadurch keine neuen Unfallrisiken hervorgerufen werden, die die hier erarbeiteten zu erwartenden Sicherheitsvorteile aus dieser Gestaltung ausgleichen könnten.

Da die Empfehlungen dieser Arbeit eher große Anlagen vorsehen, die alle vom bestehenden technischen Regelwerk abgedeckt werden, ist von einer guten Befahrbarkeit für Schwerverkehrsfahrzeuge auszugehen – auch dann, wenn im Bereich der Zu- und Einfahrt keine zusätzlichen Aufweitungen für eine „geschmeidigere Fahrweise“ vorgesehen werden. Für „Klothoiden-Kreisverkehre“ wird jedoch eine Überprüfung der Befahrbarkeit grundlegend empfohlen.

Ein weiterer, vielversprechender Ansatz wird in der Analyse von Fahrzeugdaten gesehen, die seit einigen Jahren über bordeigene Systeme in den Fahrzeugen der neueren Generationen erhoben und dokumentiert werden und somit immer umfangreicher zur Verfügung stehen. Neben allgemeinen Daten wie z.B. die Geschwindigkeit des Fahrzeuges können durch die verschiedenen Sensoren u.a. externe Informationen (z.B. zur vorliegenden Markierung und Beschilderung) sowie fahrzeuginterne Informationen (z.B. zur Lage, Dauer, Ort und Intensität von Vorgängen, die vom Fahrzeugführer durchgeführt werden wie Beschleunigungen, Bremsungen, Lenkvorgängen etc. genauso wie Eingriffe von Fahrerassistenzsystemen) erhoben werden. Hieraus können, z.B. über einen Bezug zur vorliegenden Infrastruktur des Kreisverkehrs, konkrete Informationen zum Fahrverhalten gewonnen werden. Eine externe Fahrverhaltensenerhebung könnte somit zudem entfallen.

Neben den aktuell nach wie vor relevanten Aspekten des menschlichen Verhaltens auf Straßen ist zukünftig verstärkt zu beachten, wie künstliche Intelligenzen in autonomen Fahrzeugen die Straßen „lesen“, also Informationen über Verkehrsregelung und Infrastruktur während der Fahrt aufnehmen – bspw. satelliten- oder radartechnisch oder über optisch gestützte Systeme. BELLER (2019) vertritt hierbei die Einschätzung, dass ein Kreisverkehr „mit zu den schwierigsten Situationen für ein autonomes Fahrzeug [gehört], da Verkehrsteilnehmer verdeckt sind und die Sensorik den Fokus auf verschiedene Punkte legen muss“. In diesem Zusammenhang

kann es vorteilhaft sein, den Programmen mit möglichst einheitlich gestalteten Anlagen mit wenigen Varianten eingrenzbar Berechnungsgrundlagen z.B. zum Ermitteln des Abstandes von anderen Fahrzeugen zur Verfügung stellen zu können. Es wird davon ausgegangen, dass automatisiertes bzw. autonomes Fahren zunächst auf Autobahnen verbreitet sein wird und erst im Anschluss auf dem nachgeordneten Netz. Bis dahin, und so lange kein gesetzlicher oder technischer „Zwang“ zum autonomen Fahren besteht und Verkehrsteilnehmer selbstständig fahrend am Straßenverkehr teilnehmen können bzw. möchten, bleiben die in dieser Arbeit erarbeiteten, verhaltensbasierten Aspekte von Belang.

9.4.2 Statistische Methoden in der Verkehrsverhaltensanalyse

Die eigenen Erfahrungen in dieser Arbeit sowie Erkenntnisse u.a. aus SCHMOTZ ET AL. (2021) zeigen auf, dass die zunehmend verbreitete Anwendung von statistischen Regressionsanalysen in der Unfall- und Verkehrsverhaltensanalyse nicht unhinterfragt bleiben kann.

Einschränkungen der statistischen Belastbarkeit

Für das Aufzeigen von Zusammenhängen – Korrelationen – mit einer oder sehr wenigen Dimensionen sind statistische Regressionsanalysen (mit einigen Einschränkungen z.B. hinsichtlich der Datenzusammensetzung) zwar grundsätzlich geeignet. Ein Ergebnis, dass auffällige statistische Abhängigkeiten zwischen der Sicherheit und der Anlage eines Kreisverkehrs aufzeigt, wäre somit grundsätzlich erwartbar gewesen, da Fahrverhalten und Unfallgeschehen nicht zufällig zustande kommen. Jedoch zeigen die Ergebnisse dieser und anderer Arbeiten, dass solche Zusammenhänge, die im statistischen Sinne „belastbar“ und signifikant sind, zwischen Entwurfselementen von Kreisverkehren und dem Unfall- oder Fahrverhalten nur in seltenen Fällen und nicht mit (sehr) hoher Belastbarkeit festgestellt werden konnten. Die Ursachen hierfür können vielfältig sein:

- Menschliche Verhaltensweisen hängen u.a. von Umfeldeinflüssen, vom individuellen Charakter oder von Fähigkeiten des einzelnen Menschen ab. Daher ist eine Reproduzierbarkeit oder Gleichartigkeit in Abläufen, wie sie z.B. physikalische Experimente i.d.R. aufweisen, oftmals nicht gegeben. Dies zeigt sich in der vorliegenden Arbeit u.a. in vergleichsweise niedrigen R^2 -Werten, die hier häufig nur erreichbar sind (vgl. Kapitel 4.6.4).
- Ein Verkehrsteilnehmer orientiert sich – gerade in komplexen Situationen – nicht bewusst an einzelnen Entwurfsgrößen. Dies gilt insbesondere für Kreisverkehre, wo eine immense Anzahl an entwurfstechnischen Freiheitsgraden vorliegt. Es zeigt sich, dass die Modellierung von statistisch belastbaren Zusammenhängen hierdurch abermals erschwert wird, und, wenn überhaupt, am ehesten für „abgeleitete Entwurfseigenschaften“ wie den Winkel β_{CH} herausgearbeitet werden kann.

Es kann dementsprechend konstatiert werden, dass mit statistischen Werkzeugen Zusammenhänge oftmals nur in Form von Indizien generiert werden können, und dass der Grund hierfür oftmals nicht in einem Mangel der verwendeten statistischen Methoden, sondern quasi „in der Natur der Sache“ liegt.

Eignung einfacher statistischer Methoden

Der Entwurf von Kreisverkehren ist bereits seit vielen Jahren weit entwickelt und weist ein vergleichsweise hohes Sicherheitsniveau auf. Ein zusätzlicher Sicherheitsgewinn durch eine pauschale Einzelmaßnahme (vgl. Anschnallpflicht) ist somit bei Kreisverkehren nicht erwartbar. Weiterführende Optimierungen sind möglich, aber nur anhand kleinteiliger Betrachtungen an einzelnen Teilen des Gesamtsystems erreichbar, wofür Regressionsanalysen nur bedingt geeignete Werkzeuge sind. Zudem ist ein integriertes Vorgehen unumgänglich, um Wechselwirkungen im Sinne negativer Effekte auf andere Teile des Gesamtsystems zu berücksichtigen, wobei – wie in dieser Arbeit – Zielkonflikte entstehen können. Mit einfachen statistischen Methoden können solche Zielkonflikte nicht geeignet abgebildet werden.

Frage nach Ursache und Wirkung

Bei jeder statistischen Korrelation ist zu prüfen, ob die ermittelten Abhängigkeiten vor dem fachlichen Hintergrund logisch sein können: Handelt es sich lediglich um eine rein „statistische Belastbarkeit“ im Sinne einer Rechenfunktion, oder hält diese auch der „Wirklichkeit“ stand?

Hierbei darf zudem nicht übersehen werden, dass für eine statistische Korrelation auch von Interesse ist, welche Beobachtung die Ursache und welche die Wirkung ist, also die Frage der Kausalität. Oftmals wird Kausalität vorausgesetzt bzw. aufgrund von logischen Verknüpfungen oder fachlichen Prämissen als „sinnvoll“ oder „wahrscheinlich“ erachtet. Bei einer rein „beobachtenden“ Erfassung der Verkehrsteilnehmer kann dies jedoch, wenn mehrere Ursachen denkbar sind, allenfalls unterstellt werden – etwa bei der Frage, weshalb ein Fahrzeugführer im Zuge der Kreisverkehrszufahrt eine (zu) hohe Geschwindigkeit wählt:

- Wurde der Kreisverkehr nicht bzw. zu spät erkannt?
oder
- Wurde der Kreisverkehr zwar erkannt, aber in Bezug auf die fahrbare Geschwindigkeit falsch eingeschätzt?

Es zeigt sich, dass die Ursache der messtechnisch ermittelbaren Wirkung „(zu) hohe Geschwindigkeit“ je nach Verkehrsteilnehmer divergieren kann. Rein aufgrund statistischer Auswertungen von Beobachtungen kann die Ursache nicht ermittelt werden. Ein Extremfall wäre eine sogenannte zweiseitige Kausalität, wenn eine Beobachtung sowohl Ursache als auch Wirkung sein kann. Die explizite Frage danach, was Ursache und was Wirkung ist, muss

schlussendlich weiteren Forschungen vorbehalten bleiben. Eine Analyse von Fahrzeugdaten beispielsweise könnte hier vertiefte Erkenntnisse bereitstellen.

Fazit

Es zeigt sich, dass statistische Regressionsuntersuchungen in der Unfall- und Verkehrsverhaltensanalyse zwar zunehmend beliebt, aber – aufgrund der teilweise nur wenig spezifizierten Anwendung – nur bedingt geeignete Methoden zum Erreichen aussagekräftiger Ergebnisse sind. Teilweise besteht durch vordergründig eindeutige (d.h. statistisch belastbare) Ergebnisse auch Raum für Missdeutungen. Um belastbarere Ergebnisse zu erreichen, sind oftmals begleitende oder vertiefende Untersuchungen notwendig.

Der statistische Werkzeugkasten bietet hierfür hoch spezialisierte Instrumente, die sich nur Experten erschließen. Vor diesem Hintergrund erscheint es angezeigt, dass aus dem großen Kanon verschiedener statistischer Herangehensweisen diejenigen Methoden für die ingenieurfachliche Anwendung identifiziert werden, die in den verschiedenen Einsatzbereichen der Unfall- und Verkehrsverhaltensanalyse geeignet sind. Hierzu gehört auch, für jede Methode Einsatzbedingungen in Bezug auf Kollektivgrößen, Kollektivzusammensetzung etc. sowie Einsatzgrenzen im Sinne von Ausschlusskriterien zu benennen.

10 Literaturverzeichnis

ADAC - ALLGEMEINER DEUTSCHER AUTOMOBIL-CLUB (o.J.): ADACsignale - Berechnung des Anhaltewegs (ADAC), Hg. v. ADAC Bereich Verkehrssicherheitsprogramme. Online verfügbar unter https://www.adac.de/_mmm/pdf/Verkehr_und_Mathe_Anhalteweg_45164.pdf, zuletzt geprüft am 08.05.2019.

AL-MARAFI, M. NOUR; SOMASUNDARASWARAN, K.; AYERS, R. (2018): Developing crash modification factors for roundabouts using a cross-sectional method. In: Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.10.012>.

AMBROS, J.; NOVÁK, J.; BORSOS, A.; HÓZ, E.; KIEĆ, M.; MACHCINIĆ, Š.; ONDREJKA, R. (2016): Central European comparative study of traffic safety on roundabouts. In: Transportation Research Procedia 14, S. 4200–4208.

BAUM, H.; KRANZ, T.; WESTERKAMP, U. (2010): Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Reihe Mensch und Sicherheit, Heft M 208, Bergisch Gladbach.

BELLER, M. (2019): Autonomes Fahren im Praxistest: ZF Teststrecke im Selbstversuch, doubleSlash Blog. Online verfügbar unter <https://blog.doubleslash.de/autonomes-fahren-im-praxistest-zf-teststrecke-im-selbstversuch/>, zuletzt geprüft am 02.01.2022.

BLECH, R. (2020): www.studyflix.de; Wirtschaftswissenschaften, Mikroökonomie, Haushaltstheorie: Nutzenfunktion und Indifferenzkurve. Studyflix GmbH, 86153 Augsburg, Deutschland. Online verfügbar unter <https://studyflix.de/wirtschaftswissenschaften/nutzenfunktion-und-indifferenzkurven-80>, zuletzt geprüft am 12.01.2020.

BRILON, W. (1997): Sicherheit von Kreisverkehrsplätzen. In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Heft 43, Kirschbaum-Verlag, Bonn.

BRILON, W. (1999): Entwicklung der Kreisverkehrsplätze in Europa. In: Kreisverkehr. Schriftenreihe der Straßenbauverwaltung Baden-Württemberg, Heft 9, Stuttgart.

BÜHLMANN, F.; SPACEK, P. (1997): Unfallgeschehen und Geometrie der Kreiselanlagen, Forschungsarbeit Nr. 17/93 des Eidgenössischen Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartements, Zürich.

CEDERSUND, H. A. (1988): Intersections without Traffic Signals. In: Intersections without Traffic Signals, Band I, Springer-Verlag, Berlin.

COTTIN, C.; DÖHLER, S. (2013): Risikoanalyse Modellierung, Beurteilung und Management von Risiken mit Praxisbeispielen, Wiesbaden: Springer Spektrum.

DANIELS, S.; BRIJS, T.; NUYTS, E.; WETS, G. (2011): Extended prediction models for crashes at roundabouts. In: Safety Science 49.

DAT - DEUTSCHE AUTOMOBIL TREUHAND (2015): Anteil der Autos die mit einem Antiblockiersystem (ABS) ausgestattet sind im Jahr 2015 in Deutschland (DAT). Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/255282/umfrage/anteil-der-pkw-mit-antiblockiersystem/>, zuletzt geprüft am 08.05.2019.

DETTE, H.; HÄRDLE, W. (Hg.) (2006): Statistisches Methodenbuch Verfahren, Fallstudien, Programmcodes, Heidelberg: Springer-Verlag.

DIAZ-BONE, R. (2019): Statistik für Soziologen. 5. Auflage, München: UKV Verlag.

ECKSTEIN, K.; MEEWES, V. (2002): Sicherheit von Landstraßen-Knotenpunkten: Knotenpunktgrundformen - Verkehrsregelung - Zufahrten. Hg. v. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., Köln (Mitteilungen des Institutes für Straßenverkehr Köln (ISK), Nr. 40).

EU-KOMMISSION (2018): Statistik 2017 zur Straßenverkehrssicherheit: Was steckt hinter den Zahlen? Factsheet. Hg. v. Europäische Kommission. Online verfügbar unter http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-18-2762_de.pdf., zuletzt geprüft am 23.05.2019.

FAHRMEIR, L.; KNEIB, T.; LANG, S. (2009): Regression Modelle, Methoden und Anwendungen. 2. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Statistik und ihre Anwendungen).

FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESEN (1995): Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Linienführung (RAS-L), FGSV-Verlag, Köln.

FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESEN (1998): Merkblatt für die Anlage von kleinen Kreisverkehrsplätzen (M KLKV), FGSV-Verlag, Köln.

FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESEN (2003): Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen (ESN), FGSV-Verlag, Köln.

FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESEN (2006): Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren (M KV), FGSV-Verlag, Köln.

FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESEN (2012): Merkblatt zur Örtlichen Unfalluntersuchung in Unfallkommissionen (M Uko), FGSV-Verlag, Köln.

FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESEN (2012): Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL), FGSV-Verlag, Köln.

FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESEN (2017): Hinweise zu Unfallkostensätzen (H Uks), FGSV-Verlag, Köln.

GAMBARD, J.-M.; ALPHAND, F. (1991): Les carrefours giratoires: recherches et développement en France. In: strasse und verkehr - route et traffic, März 1991, Zürich.

GOEBBELS, S.; RITTER, S. (2018): Mathematik verstehen und anwenden - von den Grundlagen bis zu Fourier-Reihen und Laplace-Transformation. 3. Auflage, Berlin: Springer Spektrum.

HALLER, W. (1999): Einsatz und bauliche Gestaltung von kleinen Kreisverkehrsplätzen. In: Kreisverkehr. Schriftenreihe der Straßenbauverwaltung Baden-Württemberg, Heft 9, Stuttgart.

HUBER, C. A. (1995): Sicherheit von Kreiselanlagen Erfahrungen und vorläufige Empfehlungen. In: strasse und verkehr - route et traffic, November 1995, Zürich.

JENSEN, S. UNDERLIEN (2013): Safety Effects of Converting Intersections to Roundabouts. In: Transportation Research Record, No. 2389, Washington.

JENSEN, S. UNDERLIEN (2014): Safety Effect of Height of Central Island, Sight Distances, Markings and Signage at Single-lane Roundabouts. In: Paper for ISHGD, Vancouver, 2015, eingereicht 2014, Kongens Lyngby.

LAUX, H.; GILLENKIRCH, R. M.; SCHENK-MATHES, H. Y. (2014): Entscheidungstheorie, Berlin/Heidelberg: Springer Gabler.

LENSING, N.; MAVRIDIS, G.; TÄUBNER, D. (2001): Vereinfachtes Hochrechnungsverfahren für Außerorts-Straßenverkehrszählungen. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Reihe Verkehrstechnik, Bergisch Gladbach.

LINDENMANN, H. P.; SPACEK, P. (1991): Vorlesungsunterlage Verkehrskreisel, IVT Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau der ETH Zürich, Zürich.

MSV NRW - MINISTERIUM FÜR STADTENTWICKLUNG UND VERKEHR DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (1993): Kleine Kreisverkehre - Empfehlungen zum Einsatz und zur Gestaltung (MSV NRW), Düsseldorf (Heft 16).

MWAW BW - MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ARBEIT UND WOHNUNGSBAU BADEN-WÜRTTEMBERG (2002): Landesentwicklungsplan (LEP) (MWAW BW), Stuttgart.

ORSINI, F.; GECHELE, G.; GASTALDI, M.; ROSSI, R. (2018): Collision prediction in roundabouts: a comparative study of extreme value theory approaches. In: Transportmetrica A: Transport Science. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1080/23249935.2018.1515271>.

PFLIEGER, V. (2014): Bestimmtheitsmaß R^2 Teil 1 bis 5. Hg. v. INWT Statistics GmbH, Berlin (INWT Blog: Data Science). Online verfügbar unter <https://www.inwt-statistics.de/blog.html>, zuletzt geprüft am 18.07.2019.

REIFFER, A. (2015): Sicherheitstechnische Untersuchung von Unfalltypen an Kreisverkehren. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Straßen- und Eisenbahnenwesen (ISE), Karlsruhe.

RICHTER, T.; HÜSKEN, B. (1998): Einsatzkriterien für Kreisverkehrsplätze außerhalb bebauter Gebiete. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 757, Bonn.

ROOS, R.; ZIMMERMANN, M. (2015): Sachverständigengutachten zum Gefährdungspotenzial an 6 Kreisverkehren, (Sachverständigengutachten, unveröffentlicht), Karlsruhe.

ROOS, R.; ZIMMERMANN, M.; LOEBEN, W.-H. VON (2005): Mögliche Bremsverzögerung in Abhängigkeit von der Straßengriffigkeit. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 912).

SCHMOTZ, M.; SCHRÖTER, B.; SCHEMMELE, A.; LIPPOLD, C.; SCHULZE, C. (2021): Kreisverkehre an Landstraßen Auswirkungen der Erkennbarkeit und der Zufahrtsgestaltung auf die Verkehrssicherheit. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Reihe Verkehrstechnik, V 343, Bergisch Gladbach.

SCHNIEDER, E.; SCHNIEDER, L. (2013): Verkehrssicherheit Maße und Modelle, Methoden und Maßnahmen für den Straßen- und Schienenverkehr, Heidelberg: Springer Vieweg.

SETRA - SERVICE D'ÉTUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES (1998): Aménagement des Carrefours Interurbains – Carrefours plan (SETRA), Bagneux, France.

SPAHN, V.; BÄUMLER, G. (2007): Sicherheit von Kreisverkehrsplätzen und Lichtzeichenanlagen in Bayern. In: Straßenverkehrstechnik, Heft 7.2007, Kirschbaum-Verlag, Bonn.

STUWE, B. (1992): Untersuchung der Leistungsfähigkeit und der Verkehrssicherheit an deutschen Kreisverkehrsplätzen. In: Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Heft 10, Bochum.

V&W - MINISTERIE VAN VERKEER EN WATERSTAAT - MINISTRY OF TRANSPORT, PUBLIC WORKS AND WATER MANAGEMENT (2009): Roundabouts - Application and design (V&W).

VIETEN, M.; DOHMEN, R.; DÜRHAGER, U.; LEGGE, K. (2010): Quantifizierung der Sicherheitswirkungen verschiedener Bau-, Gestaltungs- und Betriebsformen auf Landstraßen. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Reihe Verkehrstechnik, Heft V 201, Bergisch Gladbach.

VSS - VEREINIGUNG SCHWEIZERISCHER STRASSENFACHLEUTE (1999): Knoten mit Kreisverkehr
- Schweizer Norm SN 640 263 (SN 640 263), Zürich.

WAMBSGANSS, L. (2018): Akzeptanz von Zeitlücken bei der Einfahrt in Kreisverkehre bei unterschiedlichen geometrischen Randbedingungen. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen (ISE), Karlsruhe.

WEISE, G.; DURTH, W.; KLEINSCHMIDT, P.; LIPPOLD, C. (1997): Straßenbau - Planung und Entwurf. 3. Auflage, Berlin: Verlag für Bauwesen.

WIKIPEDIA (2012): Artikel "Klothoide". Hg. v. „Wikipedia – Die freie Enzyklopädie“, Wikimedia Foundation Inc. Online verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Klothoide>, zuletzt geprüft am 19.02.2022.

ZIEGLER, G. (1999): Kreisverkehrsplätze in Baden-Württemberg, Bestand/Planung. In: Kreisverkehr. Schriftenreihe der Straßenbauverwaltung Baden-Württemberg, Heft 9, Stuttgart.

11 Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------------|--|----|
| Bild 2.1: | Gestaltungselemente und Maße eines Kreisverkehrs (Systemskizze) | 19 |
| Bild 2.2: | Fahrbahnteiler an einem Kreisverkehr | 20 |
| Bild 2.3: | Beispiele für Fahrbahnteiler | 20 |
| Bild 2.4: | Ablenkmaß im Kreisverkehr | 21 |
| Bild 2.5: | Schweizer Entwurfsregelwerk: Projektierungselemente eines Kreisverkehrs..... | 23 |
| Bild 2.6: | Französisches Entwurfsregelwerk: Schema eines Kreisverkehrsarmes für einen Außenradius $R_g = 20$ m | 25 |
| Bild 2.7: | Französisches Entwurfsregelwerk: Kontrolle der Ablenkung der Fahrlinie (déflexion)..... | 25 |
| Bild 2.8: | Niederländisches Entwurfsregelwerk: Maße zur Abschätzung des Geschwindigkeitsniveaus..... | 26 |
| Bild 2.9: | Unterscheidung der Zufahrtsgestaltung in „radial“ oder „tangential“ | 33 |
| Bild 4.1: | Verkehrszeichen und Fahrbahnmarkierungen an Kreisverkehren außerorts | 46 |
| Bild 4.2: | Abstand des Beginns der Fahrbahnrandverziehung von der Kreisfahrbahn | 46 |
| Bild 4.3: | Beispiel für eine sehr weit ausholende Verziehung | 47 |
| Bild 4.4: | Verhältnisse Außendurchmesser D und Breite der Kreisfahrbahn B_K | 51 |
| Bild 4.5: | Verhältnisse Fahrstreifenbreite in der Zufahrt B_Z und Eckausrundung R_Z | 52 |
| Bild 4.6: | Verhältnisse Verkehrsstärke DTV zum Außendurchmesser D | 52 |
| Bild 4.7: | Verteilung der Fahrbahnteilerbreite im Kollektiv 1.3 | 53 |
| Bild 4.8: | Beispiele für Winkel zum „Arm links“ bzw. für die Ablenkung bei drei- bzw. fünfarmigen Kreisverkehren..... | 53 |
| Bild 4.9: | Verteilung der Winkel zwischen den Kreisverkehrsarmen im Kollektiv 1.3 | 54 |
| Bild 4.10: | Verhältnisse Fahrstreifenbreite B_Z und Ablenkung A | 54 |
| Bild 4.11: | Verhältnisse Ablenkmaß A / B_Z zu Winkel β_{CH} | 55 |
| Bild 4.12: | Verhältnisse Ablenkmaß A / B_Z zur Kurvigkeit KU_{200} | 57 |
| Bild 4.13: | Absolute und relative Anteile der Unfälle nach Unfalltypen innerhalb von Kollektiv 1.2 | 60 |
| Bild 4.14: | Prozentuale Verteilung der Unfälle nach Unfalltyp und Unfallkategorie innerhalb von Kollektiv 1.2 | 60 |
| Bild 4.15: | Durchschnittliche Unfallkosten eines Unfalls je Unfalltyp in Kollektiv 1.2..... | 61 |
| Bild 4.16: | Anteile der Unfallkosten (UK) je Unfalltyp an den Gesamtunfallkosten von Kollektiv 1.2 | 61 |
| Bild 4.17: | Stilisiertes Unfalldiagramm mit drei oder mehr Fahrnunfällen inklusive Differenzierung der Unfallart | 63 |
| Bild 4.18: | Unfallmerkmale "Lichtverhältnisse" und "Alkoholkonsum" bei Fahrnunfällen ... | 64 |
| Bild 4.19: | Durchschnittliche Unfallkosten von Fahrnunfällen in Abhängigkeit von Unfallursachen bzw. -merkmalen..... | 64 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Bild 4.20: | Absolute und relative Anteile der Unfälle nach Unfalltypen innerhalb von Kollektiv 1.3 | 66 |
| Bild 4.21: | Durchschnittliche Unfallrate in Kollektiv 1.3 in Abhängigkeit von verschiedenen Bezugsgrößen | 67 |
| Bild 4.22: | Durchschnittliche Unfallkostenrate in Kollektiv 1.3 in Abhängigkeit von verschiedenen Bezugsgrößen | 67 |
| Bild 4.23: | Zufahrten mit den 20 höchsten UR nur infolge von Unfällen mit UTyp 1 (alle anderen UR im Vergleich) | 68 |
| Bild 4.24: | Zufahrten mit den 20 höchsten UR nur infolge von Unfällen mit UTyp 3 (alle anderen UR im Vergleich) | 68 |
| Bild 4.25: | Zufahrten mit den 20 höchsten UR nur infolge von Unfällen mit Utyp 6 (alle anderen UR im Vergleich) | 68 |
| Bild 4.26: | Zufahrten mit den 20 höchsten UKR infolge von allen Unfällen überlagert (UKR der einzelnen Unfalltypen jeweils im Vergleich)..... | 68 |
| Bild 4.27: | Deskriptive Signifikanzwertung der Regressionsanalyse über einzelne Geometrieckenngößen (Stufe 1) | 71 |
| Bild 5.1: | Beispielhafte Veranschaulichung des Untersuchungsaufbaus | 79 |
| Bild 5.2: | Geschwindigkeitsverlaufslinien von „frei fahrenden“ und „hinterher fahrenden“ Fahrzeugen im Vergleich | 81 |
| Bild 5.3: | „Typisches“ Geschwindigkeitsverhalten gemäß FGSV-Merkblatt zu Kreisverkehren | 82 |
| Bild 5.4: | Anhaltewege in Abhängigkeit von der Ausgangsgeschwindigkeit V_1 | 84 |
| Bild 5.5: | Geschwindigkeitsverlaufslinien von Fahrzeugen, die vor der Kreiseinfahrt verzögern | 86 |
| Bild 5.6: | Zufahrendes Fahrzeug (1) und bevorrechtigtes Fahrzeug (2) in kritischer Konstellation | 87 |
| Bild 5.7: | Unterteilung der Kreisdurchfahrt in Segmente und Bestimmung der Lage der Messstellen | 90 |
| Bild 5.8: | Vergleich der festgestellten Geschwindigkeiten an den Messstellen..... | 92 |
| Bild 5.9: | Quadratische Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Breite des Fahrbahnteilers B_{FT} | 94 |
| Bild 5.10: | Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und die Kurvigkeit KU_{15} im Segment S1-10..... | 96 |
| Bild 5.11: | Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{15} und die Kurvigkeit KU_{85} im Segment S1-10..... | 97 |
| Bild 5.12: | Fahrtgenauer Vergleich von Geschwindigkeit V_{85} und Kurvigkeit KU_{S1-10} (MS 3, ausgewählte Zufahrten)..... | 98 |
| Bild 5.13: | Vergleich der Geschwindigkeit V_{15} an MS 3 und 4 mit der Kurvigkeit in Segment S2..... | 99 |
| Bild 5.14: | Ausgewählte Geschwindigkeitsverlaufslinien für „frei fahrende“ Fahrzeuge . | 100 |
| Bild 5.15: | Unfallrate UR von Unfalltyp 1 über V_{85} an MS 1 bis 3 | 101 |
| Bild 5.16: | Unfallrate UR von Unfalltyp 3 über V_{85} bzw. über Verhältniswert V_{85} / KU_{200} (zufahrendes Fahrzeug) | 102 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Bild 5.17: | Unfallrate UR Unfalltyp 3 _{folgende Zufahrt} über V_{15} (bzw. V_{85}) bzw. über Verhältniswert V_{15} / KU_{200} | 103 |
| Bild 5.18: | Vergleich der Einfahrwinkel mit Unfallrate UR bzw. Unfallkostenrate UKR .. | 104 |
| Bild 5.19: | Vergleich von „Geschwindigkeitsspannweite“ mit UR bzw. UKR des Unfalltyps 3..... | 105 |
| Bild 5.20: | Vergleich von „addierter Geschwindigkeitsdifferenz“ mit UR und UKR des Unfalltyps 3..... | 105 |
| Bild 5.21: | Konstruktionsskizze für den Winkel TE mit Angabe der Vorzeichenrichtung | 109 |
| Bild 5.22: | Vergleich V_{85} an MS 1 bis MS 4 mit dem Prüfparameter Winkel TE..... | 109 |
| Bild 5.23: | Lineare Zusammenhänge mit dem Prüfparameter Winkel TE..... | 110 |
| Bild 5.24: | Konstruktionsskizzen für den Winkel 2T mit positivem (links) und negativem Vorzeichen (rechts) | 111 |
| Bild 5.25: | Vergleich V_{85} an MS 1 bis MS 4 mit dem Prüfparameter Winkel 2T | 112 |
| Bild 5.26: | Lineare Zusammenhänge mit dem Prüfparameter Winkel 2T | 113 |
| Bild 7.1: | Risikokennzahlentwicklung für Winkel TE bei 5j UR Utyp 1 | 122 |
| Bild 7.2: | Risikokennzahlentwicklung für Winkel TE bei 5j UR Utyp 3 | 123 |
| Bild 7.3: | Risikokennzahlentwicklung für Winkel 2T bei 5j UR Utyp 3..... | 124 |
| Bild 7.4: | Risikokennzahlentwicklung für Winkel 2T bei 5j UR Utyp 3 _{folgende Zufahrt} | 126 |
| Bild 7.5: | Überlagerte Risikokennzahlentwicklungen bei unterschiedlichen Anforderungen für den Winkel TE (bei 5j UR Utyp 1 und 5j UR Utyp 3) | 127 |
| Bild 7.6: | Darstellung der vereinfachten Indifferenzkurven für die RIS-P-Werte aus Anforderungen 1) und 3)..... | 129 |
| Bild 7.7: | Kombinationen von Winkel TE und Winkel 2T im Kollektiv 1.3..... | 131 |
| Bild 7.8: | Überlagerung der Prüfparameter mit UR der Unfalltypen 1 und 3 an denjenigen Zufahrten, an denen jeweils nur einer der beiden Unfalltypen aufgetreten ist..... | 133 |
| Bild 8.1: | Überlagerte Werte für TE bzw. 2T für die Kombinationen der Parameter R_Z bzw. R_A sowie B_Z bzw. B_A gemäß Tabelle 8.2..... | 137 |
| Bild 8.2: | Empfehlenswerte, brauchbare und zu vermeidende Größenordnungen für die Prüfparameter TE und 2T | 141 |
| Bild 8.3: | Prinzipskizzen für Kreisverkehre mit variabler Achsanordnung | 141 |
| Bild 8.4: | Prinzipskizze zur Zusammensetzung des Kreisinselnkörpers aus acht Klothoidensegmenten | 145 |
| Bild 8.5: | Prinzipskizze eines „gedrehten Klothoiden-Kreisverkehrs“ (66,67 gon Verdrehung zur Zufahrtsachse) | 146 |
| Bild 8.6: | Überlagerte Werte für TE bzw. 2T für die Sonderform „gedrehter Klothoiden-Kreisverkehr“ sowie Vergleich zur Ausgangssituation | 147 |
| Bild 8.7: | Prinzipskizze für einen dreiarmigen Kreisverkehr mit einseitigem Achsversatz mit relevanten Prüfparametern | 150 |
| Bild 8.8: | Überlagerte Werte für TE bzw. 2T für Kreisverkehre mit einseitigem Achsversatz und Vergleich zur Ausgangssituation..... | 153 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Bild 8.9: | Überlagerte Werte für TE bzw. 2T für Kreisverkehre mit einseitigem Achsversatz mit D = 35 bis 42 m und Vergleich zur Ausgangssituation | 153 |
| Bild 8.10: | Prinzipskizzen für dreiarmige Kreisverkehre mit einseitigem Achsversatz (Beispiele) | 154 |
| Bild 9.1: | Übersicht über die Untersuchungsschritte | 156 |
| Bild 9.2: | Konstruktionsskizzen für die Prüfparameter TE (links) und 2T (rechts) | 158 |
| Bild 9.3: | Prinzipskizze für einen dreiarmigen Kreisverkehr mit einseitigem Achsversatz | 163 |
| Bild 14.1: | Konstruktionsskizzen zu den abstrakten Fahrlinien | 189 |
| Bild 14.2: | Lage und Umfang des Untersuchungsgebiets in Baden-Württemberg | 191 |
| Bild 14.3: | Verteilung der Außendurchmesser der Kreisverkehre, aufgeteilt in Gruppen, Kollektiv 1.2 | 191 |
| Bild 14.4: | Verteilung der Verkehrsstärken an den Kreisverkehren im Kollektiv 1.3 | 192 |
| Bild 14.5: | Absolute und relative Anteile aller Unfälle (Kollektiv 1.1) | 198 |
| Bild 14.6: | Im Kollektiv 1.1 im Vergleich zum hauptsächlich untersuchten Kollektiv 1.2 zusätzlich enthaltene Unfälle | 198 |
| Bild 14.7: | Verteilung aller Unfälle (Kollektiv 1.1) nach Unfalltyp und Unfallkategorie.... | 199 |
| Bild 14.8: | Prozentuale Verteilung aller Unfälle (Kollektiv 1.1) nach Unfalltyp und Unfallkategorie..... | 199 |
| Bild 14.9: | Alle Unfälle mit Unfallmerkmal „Alkohol“ im Kollektiv 1.2 unter Angabe der Gesamtunfallzahlen je Unfallkategorie..... | 201 |
| Bild 14.10: | Differenzierte Darstellung aller Unfälle mit bzw. ohne Unfallmerkmal „Alkohol“ | 201 |
| Bild 14.11: | Geschwindigkeitsverlaufslinien am Kreisverkehr (1) Karlsruhe-Neureut; „frei fahrende“ Fahrzeuge | 205 |
| Bild 14.12: | Geschwindigkeitsverlaufslinien am Kreisverkehr (1) Karlsruhe-Neureut; „hinterher fahrende“ Fahrzeuge | 206 |
| Bild 14.13: | Geschwindigkeitsverlaufslinien am Kreisverkehr Luisenhof-Flehingen; „frei fahrende“ Fahrzeuge | 207 |
| Bild 14.14: | Geschwindigkeitsverlaufslinien am Kreisverkehr Luisenhof-Flehingen; „hinterher fahrende“ Fahrzeuge | 208 |
| Bild 14.15: | Geschwindigkeitsverlaufslinien am Kreisverkehr Ubstadt-Weiher; „frei fahrende“ Fahrzeuge | 209 |
| Bild 14.16: | Geschwindigkeitsverlaufslinien am Kreisverkehr Ubstadt-Weiher; „hinterher fahrende“ Fahrzeuge | 210 |
| Bild 14.17: | Geschwindigkeitsverlaufslinien am Kreisverkehr Ringsheim; „frei fahrende“ Fahrzeuge | 211 |
| Bild 14.18: | Geschwindigkeitsverlaufslinien am Kreisverkehr Ringsheim; „hinterher fahrende“ Fahrzeuge | 211 |
| Bild 14.19: | Geschwindigkeitsverlaufslinien am Kreisverkehr Pfinztal-Söllingen; „frei fahrende“ Fahrzeuge | 212 |
| Bild 14.20: | Geschwindigkeitsverlaufslinien am Kreisverkehr Pfinztal-Söllingen; „hinterher fahrende“ Fahrzeuge | 212 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Bild 14.21: | Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Fahrstreifenbreite der Zufahrt B_Z | 213 |
| Bild 14.22: | Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Ausrundungsradius der Zufahrt R_Z | 213 |
| Bild 14.23: | Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Breite des Fahrbahnteilers B_{FT} | 213 |
| Bild 14.24: | Quadratische Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Fahrstreifenbreite der Zufahrt B_Z | 214 |
| Bild 14.25: | Quadratische Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Ausrundungsradius der Zufahrt R_Z | 214 |
| Bild 14.26: | Quadratische Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Breite des Fahrbahnteilers B_{FT} | 214 |
| Bild 14.27: | Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Ablenkmaß A | 215 |
| Bild 14.28: | Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Verhältnis A / B_Z | 215 |
| Bild 14.29: | Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Winkel α_{CH} | 215 |
| Bild 14.30: | Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Winkel β_{CH} | 216 |
| Bild 14.31: | Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Kurvigkeit KU_{200} | 216 |
| Bild 14.32: | Quadratische Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Ablenkmaß A | 216 |
| Bild 14.33: | Quadratische Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Verhältnis A / B_Z .. | 217 |
| Bild 14.34: | Quadratische Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Winkel α_{CH} | 217 |
| Bild 14.35: | Quadratische Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Winkel β_{CH} | 217 |
| Bild 14.36: | Quadratische Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Kurvigkeit KU_{200} ... | 217 |
| Bild 14.37: | Differenzen der Quantile der Kurvigkeiten von Fahrliniensegment S1 zu Segment S1-10 in Kollektiv 1.4, ohne Kreisverkehr (1) | 218 |
| Bild 14.38: | Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{15} und die Kurvigkeit KU_{15} im Segment S1-10..... | 218 |
| Bild 14.39: | Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{15} und die Kurvigkeit KU_{50} im Segment S1-10..... | 218 |
| Bild 14.40: | Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{15} und die Kurvigkeit KU_{85} im Segment S1-10..... | 219 |
| Bild 14.41: | Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und die Kurvigkeit KU_{15} im Segment S1-10..... | 219 |
| Bild 14.42: | Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und die Kurvigkeit KU_{50} im Segment S1-10..... | 219 |
| Bild 14.43: | Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und die Kurvigkeit KU_{85} im Segment S1-10..... | 219 |
| Bild 14.44: | Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{15} und das 85 %-Quantil der Einfahrwinkel $Wink_RA_{85}$ | 220 |
| Bild 14.45: | Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und das 85 %-Quantil der Einfahrwinkel $Wink_RA_{85}$ | 220 |
| Bild 14.46: | Vergleich von Geschwindigkeitsdifferenzen und Kurvigkeit im Fahrliniensegment S1-10..... | 220 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Bild 14.47: | Überlagerung der Prüfparameter mit Unfallraten ausschließlich von Unfalltyp 1 (Fahrunfälle) | 225 |
| Bild 14.48: | Überlagerung der Prüfparameter mit Unfallraten ausschließlich von Unfalltyp 3 (EK-Unfälle) | 225 |
| Bild 14.49: | Überlagerung der Prüfparameter mit addierten Unfallraten der Unfalltypen 1 (Fahrunfälle) und 3 (EK-Unfälle) | 226 |
| Bild 14.50: | Überlagerte Werte für TE bzw. 2T für die Variation der Winkel in Geradeaus-Richtung..... | 228 |
| Bild 14.51: | Überlagerte Werte für TE bzw. 2T für punktsymmetrische Rechts- und Linksversätze..... | 230 |
| Bild 14.52: | Überlagerte Werte für TE bzw. 2T für einseitige Achsversätze | 231 |
| Bild 14.53: | Prinzipskizze der Grundform eines "Klothoiden-Kreisverkehrs" mit 50 gon Verdrehung zur Zufahrtsachse (eigene Darstellung auf Grundlage von Wikipedia, 2012)..... | 231 |
| Bild 14.54: | Überlagerte Werte für TE bzw. 2T für beispielhafte „Klothoiden-Kreisverkehre“ | 232 |
| Bild 14.55: | Anteil der Unfalltypen an allen U(P) in den Kollektiven | 235 |

12 Tabellenverzeichnis

| | | |
|---------------|---|-----|
| Tabelle 2.1: | Verteilung der Unfälle auf die maßgeblichen Unfalltypen in ausgewählten Untersuchungen | 28 |
| Tabelle 2.2: | Unfallraten und Unfallkostenraten an Kreisverkehren in ausgewählten Untersuchungen | 32 |
| Tabelle 4.1: | Übersicht über die in dieser Arbeit verwendeten Kreisverkehrskollektive | 48 |
| Tabelle 4.2: | Im Rahmen dieser Arbeit verwendete Unfallkostensätze | 50 |
| Tabelle 4.3: | Formeln der Unfallkenngrößen als Ergebnisse der Regressionsanalyse (Stufe 2)..... | 72 |
| Tabelle 4.4: | Risiko-Entwurfs-Konstellationen und Erklärungsansätze | 75 |
| Tabelle 5.1: | Anlagenrelevante Auswahlkriterien für Kollektiv 1.4..... | 78 |
| Tabelle 6.1: | Beispiel für eine zweidimensionale Kontingenztafel (k-m - Häufigkeitstafel)..... | 116 |
| Tabelle 6.2: | Gewichtete Wahrscheinlichkeiten auf Basis der Kontingenztafel | 119 |
| Tabelle 7.1: | Grenzen der Prüfparameterkategorien bei der Überprüfung der Anforderungen 1) und 2)..... | 122 |
| Tabelle 7.2: | Grenzen der Prüfparameterkategorien bei der Überprüfung der Anforderung 3)..... | 123 |
| Tabelle 7.3: | Grenzen der Prüfparameterkategorien bei der Überprüfung der Anforderung 4)..... | 124 |
| Tabelle 7.4: | Grenzen der Prüfparameterkategorien bei der Überprüfung der Anforderung 5)..... | 126 |
| Tabelle 7.5: | Reihenfolge der Indifferenzkurven für perfekte bzw. imperfekte Substitution..... | 129 |
| Tabelle 7.6: | Zusammenfassung der erarbeiteten und validierten Werte für die Prüfkriterien | 134 |
| Tabelle 8.1: | Im Rahmen der Untersuchung nicht variierte Entwurfparameter (gemäß M KV, 2006) | 136 |
| Tabelle 8.2: | Untersuchte Kombinationen der Parameter B_Z bzw. B_A mit R_Z bzw. R_A | 136 |
| Tabelle 8.3: | Erreichbare Prüfparameter für regelmäßige vierarmige Kreisverkehre | 144 |
| Tabelle 8.4: | Erreichbare Prüfparameter für die Sonderform „gedrehter Klothoiden-Kreisverkehr“ | 147 |
| Tabelle 8.5: | Erreichbare Prüfparameter für dreiarmlige Kreisverkehre mit einseitigem Achsversatz | 154 |
| Tabelle 9.1: | Übersicht über die in dieser Arbeit entwickelten Empfehlungen für die Anlage von Kreisverkehren..... | 163 |
| Tabelle 14.1: | Übersicht über Entwurfparameter, Verhältnisgrößen und abgeleitete Größen an Kreisverkehren..... | 190 |
| Tabelle 14.2: | Kosten pro Verunglücktem nach BAUM ET AL. (2010) | 193 |
| Tabelle 14.3: | Sachschadenskosten pro Unfall nach BAUM ET AL. (2010) | 193 |
| Tabelle 14.4: | Pauschale Kostensätze KS_U je Unfall (M Uko, 2012) | 194 |
| Tabelle 14.5: | Anteile der Unfallkategorien 1 bis 3 an Unfällen mit Personenschaden, auf Basis der H Uks (2017) ergänzt..... | 195 |

| | |
|---|-----|
| Tabelle 14.6: Berechnung der Mindestkollektivgrößen gemäß H Uks (2017) | 196 |
| Tabelle 14.7: Berechnungsergebnis für angepasste Unfallkostensätze für das Kollektiv 1.1 sowie Kostensätze für Sachschadensunfälle | 197 |
| Tabelle 14.8: Übersicht über die Unfallschwerestructur von Kollektiv 1.2 | 200 |
| Tabelle 14.9: Bedeutung der Farben der Geschwindigkeitslinien | 204 |
| Tabelle 14.10: Bedeutung der Farben der Strich-Symbole im Moment der Kreiseinfahrt..... | 204 |
| Tabelle 14.11: Risikokennzahlen RIS-P für das Kategorienpaar 5j UR UTyp 1 / Winkel TE..... | 221 |
| Tabelle 14.12: Risikokennzahlen RIS-P für das Kategorienpaar 5j UR UTyp 3 / Winkel TE..... | 222 |
| Tabelle 14.13: Risikokennzahlen RIS-P für das Kategorienpaar 5j UR UTyp 3 / Winkel 2T | 223 |
| Tabelle 14.14: Risikokennzahlen RIS-P für das Kategorienpaar 5j UR UTyp 3,fZ / Winkel 2T | 224 |
| Tabelle 14.15: Prüfwerte TE und 2T für die Kombinationen der Parameter R_Z bzw. R_A sowie B_Z bzw. B_A gemäß Tabelle 8.2..... | 227 |
| Tabelle 14.16: Prüfwerte TE und 2T für Variation der Winkel in Geradeaus-Richtung..... | 228 |
| Tabelle 14.17: Übersicht und Eigenschaften der Variation "Punktsymmetrische Links- und Rechtsversätze" | 229 |
| Tabelle 14.18: Prüfwerte TE und 2T für punktsymmetrische Rechts- und Linksversätze..... | 229 |
| Tabelle 14.19: Übersicht und Eigenschaften der Variation "Einseitige Achsversätze" | 230 |
| Tabelle 14.20: Prüfwerte TE und 2T für einseitige Achsversätze | 231 |
| Tabelle 14.21: Erreichbare Prüfparameterwerte bei „Klothoiden-Kreisverkehren“ mit variierenden Achsversätzen..... | 232 |
| Tabelle 14.22: Prüfwerte TE und 2T für einseitige Achsversätze - Versatzmaße bis 4,0 m . | 233 |
| Tabelle 14.23: Vergleich der Unfallschwerestructur | 234 |
| Tabelle 14.24: Vergleich der Unfallanzahlen, UD, UR und UKR in den Kollektiven | 234 |

13 Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------|---|
| 01 | Fahrzeug 01 bzw. Unfallbeteiligter 01: Aus polizeilicher Sicht (haupt-)unfallverursachend in einen Verkehrsunfall involvierter Verkehrsteilnehmer |
| 02 | Fahrzeug 02 bzw. Unfallbeteiligter 02: Aus polizeilicher Sicht nicht (haupt-)schuldhaft in einen Verkehrsunfall involvierter Verkehrsteilnehmer |
| ABS | Anti-Blockier-System |
| aKS | angepasste Kostensätze (Unfallkostensätze) |
| BAB | Bundesautobahn |
| Bet. | Beteiligter (Unfallbeteiligter) |
| DTV | durchschnittlicher täglicher Verkehr |
| ebd. | ebenda |
| EK | Einbiegen-Kreuzen |
| ESN | Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen der FGSV |
| FGSV | Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. |
| Hg. | Herausgeber(in) |
| H Uks | Hinweise zu Unfallkostensätzen der FGSV |
| ISE | Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen |
| Kat. | Kategorie |
| Kfz | Kraftfahrzeug |
| KIT | Karlsruher Institut für Technologie |
| KU | Kurvigkeit |
| LEP | Landesentwicklungsplan |
| Lkw | Lastkraftwagen |
| LSA | Lichtsignalanlage |
| LUBW | Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg |
| max. | maximal |
| mind. | mindestens |

| | |
|---------|---|
| M KIKV | Merkblatt für die Anlage von kleinen Kreisverkehrsplätzen der FGSV (nicht mehr gültig, abgelöst durch das M KV) |
| M KV | Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren der FGSV |
| MS | Messstelle |
| MSV NRW | Ministerium für Stadtentwicklung und Verkehr Nordrhein-Westfalen |
| M Uko | Merkblatt zur Örtlichen Unfalluntersuchung in Unfallkommissionen der FGSV |
| MWAW BW | Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg |
| o.J. | ohne Jahresangabe |
| Pkw | Personenkraftwagen |
| PP | Polizeipräsidium |
| PPK | Prüfparameterkategorie |
| RAL | Richtlinien für die Anlage von Landstraßen der FGSV |
| RAS-K-1 | Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Knotenpunkte, Abschnitt 1: Plangleiche Knotenpunkte der FGSV (nicht mehr gültig, abgelöst durch die RAL) |
| RAS-L | Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Linienführung der FGSV (nicht mehr gültig, abgelöst u.a. durch die RAL) |
| REK | Risiko-Entwurfs-Konstellation |
| StVO | Straßenverkehrsordnung |
| SETRA | Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (Frankreich) |
| SN | Schweizer Norm |
| SPSS | Statistical Product and Service Solutions, Softwareprogramm |
| U | Unfall |
| U(GT) | Unfall mit Getöteten (Unfallkategorie 1) |
| U(SV) | Unfall mit Schwerverletzten (Unfallkategorie 2) |
| U(SP) | Unfall mit schwerem Personenschaden (Unfallkategorien 1 und 2) |
| U(LV) | Unfall mit Leichtverletzten (Unfallkategorie 3) |
| U(P) | Unfall mit Personenschaden (Unfallkategorien 1, 2 und 3) |

| | |
|-----------------|--|
| U(SS) | schwerwiegender Unfall mit (schwerem) Sachschaden (Kategorien 4 und 6) |
| U(LS) | Unfall mit leichtem bzw. sonstigem Sachschaden (Kategorie 5) |
| U(S) | Unfall mit Sachschaden (Kategorien 4, 5 und 6) |
| UAV | unmanned aerial vehicle („Drohne“) |
| UD | Unfalldichte |
| UK | Unfallkosten |
| UKat | Unfallkategorie |
| UKD | Unfallkostendichte |
| UKR | Unfallkostenrate |
| UR | Unfallrate |
| UTyp | Unfalltyp |
| V ₁₅ | 15 %-Quantil der Geschwindigkeit (diese Geschwindigkeit wird von 15 % der Fahrzeuge nicht überschritten) |
| V ₅₀ | 50 %-Quantil der Geschwindigkeit (diese Geschwindigkeit wird von 50 % der Fahrzeuge nicht überschritten), auch V _m (mittlere Geschwindigkeit) |
| V ₈₅ | 85 %-Quantil der Geschwindigkeit (diese Geschwindigkeit wird von 85 % der Fahrzeuge nicht überschritten) |
| vrstl. | voraussichtlich |
| VSS | Vereinigung Schweizer Strassenfachleute (Schweiz) |
| V _{ZP} | Versatzmaß der Zufahrt, an der Prüfparameter gemessen werden |
| V _{ZG} | Versatzmaß der Zufahrt, die derjenigen mit V _{ZP} gegenüberliegt |
| V&W | Ministerie van Verkeer en Waterstaat (Niederlande) |

14 Anlagen

14.1 Konstruktion der abstrakten Fahrlinien

Die abstrakte Fahrlinie besteht aus drei aneinandergefügten Kreisbögen (vgl. Bild 14.1 unten): Dem Ein- und Ausfahrkreisbogen in Fahrrichtung rechts (Seg₁ und Seg₂) und dazwischen den Kreisbogen zur Umfahrung der Kreisinsel in Fahrrichtung links (Seg₃).

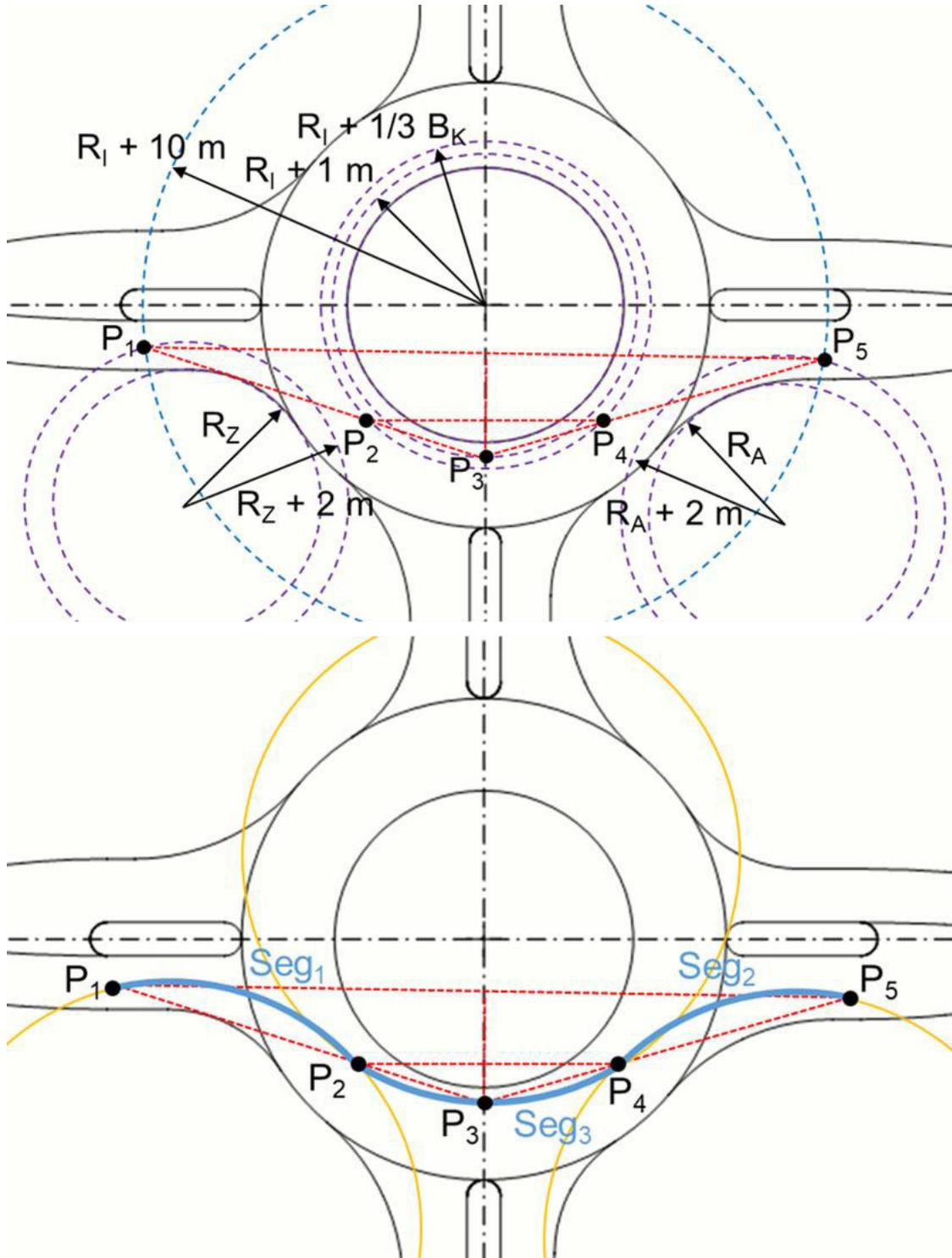


Bild 14.1: Konstruktionsskizzen zu den abstrakten Fahrlinien

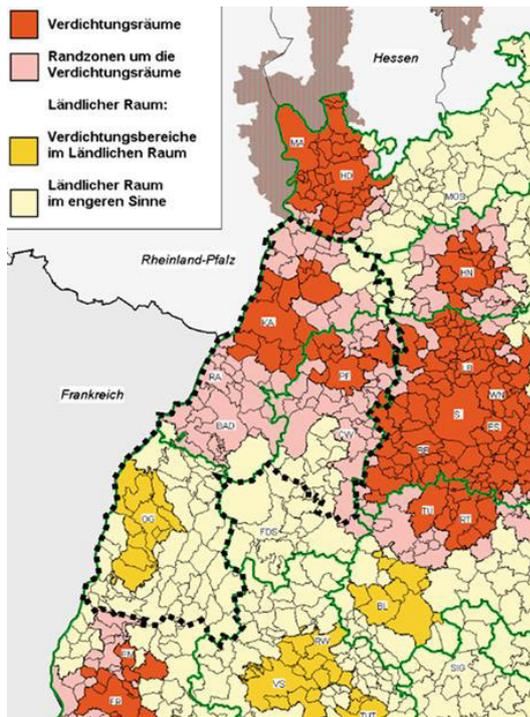
Zur Konstruktion der abstrakten Fahrlinien müssen zunächst die Punkte P1 bis P5 konstruiert werden (vgl. Bild 14.1 oben). Der Radius der Kreisbogensegmente bestimmt sich anhand der drei Punkte P2, P3 und P4. Diese Kreissegmente werden jeweils über die Kreissehnen $\overline{P1P2}$, $\overline{P2P4}$ bzw. $\overline{P4P5}$ aufgespannt (vgl. Bild 14.1 unten). Die Kurvigkeit der Fahrlinie in Geradeaus-Richtung (200 gon als idealisierter Winkel zwischen den beiden Achsen der Kreisverkehrs-arme) berechnet sich anhand von Formel (20).

$$KU_{200} = \frac{\sum \text{Winkeländerung } S_1; S_2; S_3}{\sum \text{Kreissegmentlänge } S_1; S_2; S_3} \quad (20)$$

14.2 Ergänzende Informationen zu Lage und Geometrie der Kreisverkehre

| Abkürzung / Symbol | Bezeichnung, ggfs. kurze Beschreibung |
|--|---|
| D | Außendurchmesser des Kreisverkehrs [m] |
| B _K | Breite der Kreisfahrbahn [m] |
| R _i | Kreisinselradius [m] |
| B _Z | Fahstreifenbreite der Kreiszufahrt [m] |
| R _A | Ausrundungsradius der Kreiszufahrt [m] |
| B _A | Fahstreifenbreite der Kreisausfahrt [m] |
| R _A | Ausrundungsradius der Kreisausfahrt [m] |
| D / B _K | Verhältnis Außendurchmesser zu Kreisfahrbahnbreite [-] |
| DTV / D | Verhältnis Verkehrsstärke zu Außendurchmesser |
| B _{FT} | Breite des Fahrbahnteilers [m] |
| Winkel _{Arm links} | Winkel zwischen einer und der davon in Fahrtrichtung links liegenden Zufahrt [gon] |
| A | Ablenkung geradeaus fahrender Fahrzeuge durch die Kreisinsel [m] |
| A / B _Z | „Ablenkmaß“: Verhältnis von Ablenkung und Fahstreifenbreite der Kreiszufahrt [-] |
| (A / B _Z) _{Arm links} | „Ablenkmaß“ an der in Fahrtrichtung links liegenden Zufahrt [-] |
| α _{CH} | Einfahrwinkel α gemäß dem Schweizer Regelwerk [gon] |
| α _{CH, Arm links} | Einfahrwinkel α an der in Fahrtrichtung links liegenden Zufahrt [gon] |
| β _{CH} | Ablenkungswinkel β gemäß dem Schweizer Regelwerk [gon] |
| β _{CH, Arm links} | Ablenkungswinkel β an der in Fahrtrichtung links liegenden Zufahrt [gon] |
| KU ₂₀₀ | Kurvigkeit der abstrakten Fahrlinie in Geradeaus-Richtung [gon/10m] |
| KU _{200, Arm links} | Kurvigkeit der abstrakten Fahrlinie in Geradeaus-Richtung an der in Fahrtrichtung links liegenden Zufahrt [gon/10m] |

Tabelle 14.1: Übersicht über Entwurfparameter, Verhältnisgrößen und abgeleitete Größen an Kreisverkehren



Erläuterungen:

- Schwarz umrandet: Untersuchungsgebiet (Bereich der Polizeipräsidien Karlsruhe und Offenburg zum Stand Januar 2017; Landkreise Karlsruhe, Calw, Rastatt, Enzkreis, Ortenaukreis, Stadtkreise Karlsruhe, Pforzheim, Baden-Baden)
- Farben: Raumkategorien gemäß Landesentwicklungsplan Baden-Württemberg 2002

Kartengrundlage aus MWAU BW (2002)

Bild 14.2: Lage und Umfang des Untersuchungsgebiets in Baden-Württemberg

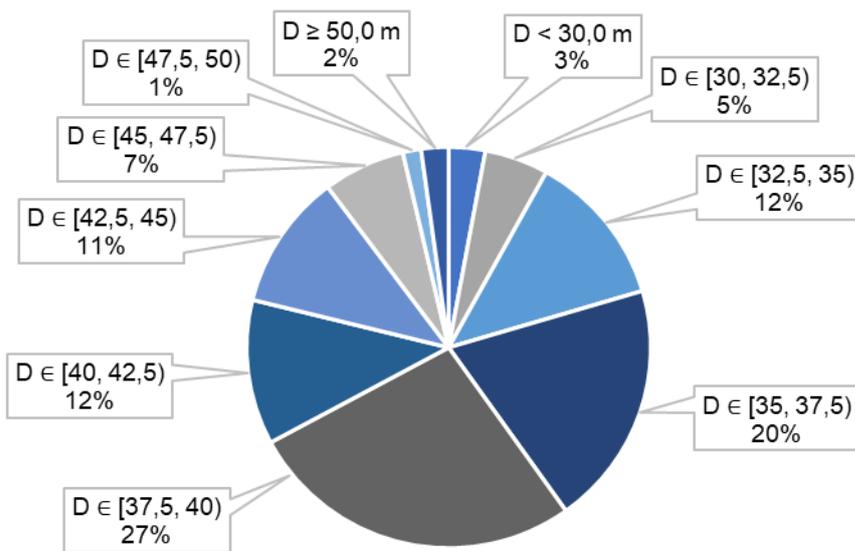


Bild 14.3: Verteilung der Außendurchmesser der Kreisverkehre, aufgeteilt in Gruppen, Kollektiv 1.2

14.3 Verkehrsstärken (DTV) der Kreisverkehre

Die öffentlich verfügbaren Messdaten zur Verkehrsstärke (z.B. DTV-Daten der damaligen Landesstelle für Straßentechnik Baden-Württemberg aus Zählungen 2010 bzw. 2015 oder Daten für 2012 aus dem Online-Tool „Verkehrssicherheitscreening“) umfassen ausschließlich Netzkanten klassifizierter Straßen. Durch diese Daten konnte nur für sieben Knotenpunkte der DTV vollständig ermittelt werden. Über online auf den Webseiten vieler Gemeinden verfügbarer Verkehrsbelastungspläne jüngerer Datums (insb. im Zusammenhang mit Lärmaktionsplänen) wurde die Verkehrsbelastung einiger Knoten ergänzt, noch fehlende Ströme wurden durch

eigene Erhebungen hinzugefügt (manuelle Zählungen in Vier-Stunden-Intervallen; Hochrechnung nach dem Verfahren „DTV-Schätzung ohne Kenntnis der Wochen- und Jahresganglinien“ von LENSING ET AL., 2001). Auf diese Weise wurde die Verkehrsstärke für insgesamt 50 Kreisverkehre mit 187 Armen vollständig ermittelt. Diese Kreisverkehre sind als „Kollektiv 1.3“ zusammengefasst (vgl. Tabelle 4.1). Eine Übersicht über die verwendeten Verkehrsstärken für Kollektiv 1.3 zeigt Bild 14.4.

Es ist dabei für alle vorgenommenen Auswertungen ausreichend, eine gemittelte Gesamtverkehrsstärke für den ganzen Knotenpunkt zu kennen. Da der Kreisverkehr im Rahmen der Unfallauswertungen zufahrtsgenau betrachtet und somit in einzelne Einmündungs-Situationen aufgeteilt wird, entspricht die Verkehrsstärke an jeder Einmündungssituation (Summe der an dieser Zufahrt einfahrenden Fahrzeuge und der auf der Kreisfahrbahn fahrenden Fahrzeuge) der Hälfte der Gesamtverkehrsstärke des gesamten Kreisverkehrs (alle auf den Kreis zufahrenden Fahrzeuge).

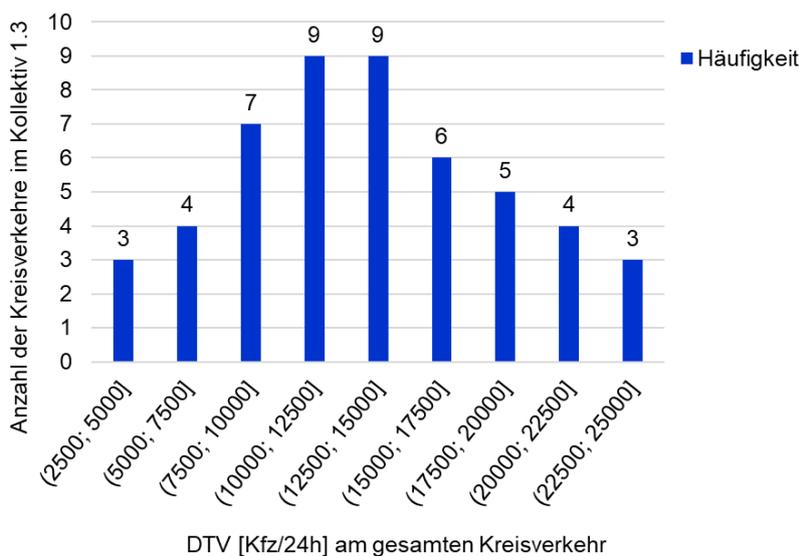


Bild 14.4: Verteilung der Verkehrsstärken an den Kreisverkehren im Kollektiv 1.3

14.4 Bestimmung der angepassten Unfallkosten

14.4.1 Allgemeines

Um eine detaillierte Unterscheidung der einzelnen Zufahrten zu ermöglichen, wird auch die Unfallschwere der dort lokalisierten Unfälle mit hinzugezogen. Hierfür wird jeder Unfall entsprechend seiner Unfallkategorie monetär bewertet. Diese monetäre Bewertung basiert auf volkswirtschaftlichen Betrachtungen und enthält dabei einerseits Sachschadensbetrachtungen der unfallbedingt entstandenen Schäden bspw. an Fahrzeugen, der Straßenausstattung etc. sowie andererseits Personenschadensbetrachtungen, in die etwa Kosten des Gesundheitssystems als auch volkswirtschaftliche Ausfallkosten infolge von Fehlzeiten in der Wertschöpfungskette einfließen (vgl. BAUM ET AL., 2010).

Grundsätzlich bieten sich verschiedene Unfallkostensätze für Straßenverkehrsunfälle in unterschiedlichen Genauigkeiten zur Verwendung an.

14.4.2 Verunglücktencharfe Unfallkostensätze

Die Bundesanstalt für Straßenwesen schreibt in unregelmäßigen Abständen die volkswirtschaftlichen Betrachtungen zur Berechnung von Unfallkosten fort; das zum Bearbeitungsstand (Dezember 2017) aktuelle Werk hierfür ist Heft M 208 (BAUM ET AL., 2010). Als Ergebnis aufwändiger Berechnungen finden sich dort bspw. die „aktualisierten Kosten pro Verunglücktem“; der Preisstand bezieht sich auf das Jahr 2005. Diese Kosten setzen sich aus volkswirtschaftlichen Bestandteilen zusammen: Direkte und indirekte Reproduktionskosten, Ressourcenausfallkosten, Kosten für die außermärkliche Wertschöpfung sowie humanitäre Kosten. Auf entsprechende Weise können Sachschadenskosten je Unfall berechnet werden; hierbei ersetzt der Posten Zeitkosten die humanitären Kosten. Tabelle 14.2 und Tabelle 14.3 geben einen Überblick über die herangezogenen Kosten, aufgeteilt in Kosten pro Verunglückten und Sachschadenskosten pro Unfall.

| | Getötete | Schwerverletzte | Leichtverletzte |
|---|--------------|-----------------|-----------------|
| Aktualisierte Kosten pro Verunglücktem 2005 [EUR] | 1.018.064,51 | 105.476,98 | 4.304,70 |

Tabelle 14.2: Kosten pro Verunglücktem nach BAUM ET AL. (2010)

| | Unfall mit Getöteten | Unfall mit Schwerverletzten | Unfall mit Leichtverletzten | Schwerwiegender Unfall mit Sachschaden | Sonstige Sachschadensunfälle |
|--|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|------------------------------|
| | U(GT) | U(SV) | U(LV) | U(SS) | U(LS) |
| Aktualisierte Sachschadenskosten pro Unfall 2005 [EUR] | 38.343,72 | 18.386,27 | 12.326,42 | 17.883,82 | 5.277,53 |

Tabelle 14.3: Sachschadenskosten pro Unfall nach BAUM ET AL. (2010)

Mit diesen Kosten ist es möglich, jeden Unfall anhand der Kategorie (Sachschadensanteil) und der konkreten Anzahl der Getöteten, Schwer- bzw. Leichtverletzten (Personenschadensanteil) monetär zu bewerten. Dabei kann jedoch keine Anpassung an die Straßenkategorie oder an Besonderheiten im tatsächlich vorliegenden Unfallgeschehen getroffen werden; es ist somit ein Mittelwert über alle Unfälle aller Verkehrsteilnehmer auf allen Straßen Deutschlands.

Auch wenn diese Berechnungsmethode nach BAUM ET AL. (2010) im Vergleich zu früheren Methoden verbessert wurde, ist auffallend, um wie viel höher die Kosten für Getötete im Ver-

gleich zu Schwerverletzten sind. Dies mag zwar inhaltlich gerechtfertigt sein, jedoch sind Unfälle mit Getöteten vergleichsweise selten und können daher gerade bei kleinen Untersuchungskollektiven die Ergebnisse verfälschen.

14.4.3 Pauschale Unfallkosten

Pauschale Unfallkostensätze beinhalten Informationen aus einem sehr großen, bundesweiten Unfallkollektiv über die mittlere Zusammensetzung eines kleineren Unfallkollektivs (Anzahl der verunfallten Fahrzeuge oder Personen) auf einer Straßenkategorie (z.B. Autobahn, Landstraße, etc.). Unfälle können somit pauschal nur mit Angabe der schwerwiegendsten Unfallfolge (über die Unfallkategorie) monetär bewertet werden. Die pauschalen Unfallkostensätze KS_U für den Preisstand 2009 finden sich im FGSV-Merkblatt M Uko (vgl. Tabelle 14.4). Dort sind die Unfälle mit Getöteten oder Schwerverletzten als Unfall mit schwerem Personenschaden U(SP) zusammengefasst, um gerade bei kleinen Unfallkollektiven keine Verzerrungen durch reine Kostensätze für Getötete hervorzurufen. Die Kostensätze sind weiterhin unabhängig vom tatsächlich durch die Verkehrszusammensetzung und ihrem Verhalten hervorgerufenen Unfallgeschehen.

| | Unfall mit schwerem Personenschaden U(SP) | Unfall mit Leichtverletzten U(LV) | Unfall mit Personenschaden U(P) | Schwerwiegender Unfall mit Sachschaden U(SS) | Sonstiger Unfall mit Sachschaden U(LS) |
|--|--|--------------------------------------|------------------------------------|---|---|
| Kostensätze KS_U zum Preisstand 2009 auf Landstraßen [EUR] | 266.000 | 24.700 | 100.000 | 17.900 | 4.190 |

Tabelle 14.4: Pauschale Kostensätze KS_U je Unfall (M Uko, 2012)

14.4.4 Angepasste Unfallkostensätze

Da in der Literaturanalyse (vgl. Kapitel 2.3) erkannt wurde, dass die Unfälle an Kreisverkehren i.d.R. weniger schwere Unfallfolgen hervorrufen als an fast allen anderen Knotenpunktarten, erscheint es wenig sinnvoll, zur Unfallanalyse allgemeingültige Kostensätze zu verwenden, denen ein unbekannter, mutmaßlich größerer Anteil an Unfällen höherer Kategorie zu Grunde liegt.

Dies zeigt sich auch im Vergleich des vorliegenden Unfallkollektivs 1.2 mit einem Kollektiv von allen Unfällen mit Personenschaden in Deutschland von 2010 (H Uks, 2017). Der Anteil der U(SP) im Kollektiv 1.2 liegt in beiden Kategorien deutlich unter dem Wert für Außerortsstraßen (vgl. Tabelle 14.5).

Dies spricht deutlich dafür, eigene, angepasste Unfallkosten auf Basis des Kollektivs 1.2 für die anstehende Unfalluntersuchung zu ermitteln.

| Unfallkategorie | Kollektiv: Alle Unfälle mit Personenschaden in Deutschland 2005 | | | | Kollektiv 1.2: Kreisverkehre außerorts |
|-----------------|--|------------|-----------|--------|--|
| | Autobahn | Landstraße | Innerorts | Ø | |
| 1 - U(GT) | 2,0 % | 2,8 % | 0,5 % | 1,2 % | 1,1 % |
| 2 - U(SV) | 19,6 % | 26,6 % | 15,9 % | 18,9 % | 12,3 % |
| 3 - U(LV) | 78,4 % | 70,6 % | 83,6 % | 79,9 % | 86,6 % |

Tabelle 14.5: Anteile der Unfallkategorien 1 bis 3 an Unfällen mit Personenschaden, auf Basis der H Uks (2017) ergänzt

Eine eigene Berechnung von angepassten Unfallkostensätzen ist jedoch nur bei bestimmten Kollektivgrößen zielführend. Hierfür bieten die Hinweise zu Unfallkostensätzen ein aktuelles Verfahren zur Ermittlung von notwendigen Kollektivgrößen zur Berechnung von angepassten Unfallkostensätzen (H Uks, 2017).

Die Berechnung eines Grenzwertes für die Unfallkollektivgröße, ab dem die separate Ausweisung von Kostensätzen für Unfälle der Kategorie 1 empfohlen wird, erfolgt gemäß Formel (21) nach H Uks.

$$n_{\min,GT} = a \cdot x^b \quad (21)$$

mit:

$$\begin{aligned} n_{\min,GT} &= \text{Mindestkollektivgröße } U(P) \\ x &= \text{Anzahl } U(GT)/1.000 \text{ } U(P) \\ a, b &= \text{Funktionsparameter} \end{aligned}$$

Liegt die Unfallkollektivgröße $U(P)$ unter dem Grenzwert nach Formel (21), aber über dem Grenzwert nach Formel (22), so ist eine Berechnung von angepassten bzw. spezifischen Unfallkostensätzen, bei der die Unfälle der Kategorien 1 und 2 gemeinsam betrachtet werden, vorzunehmen.

$$n_{\min,GT+SV} = a + x \cdot b \quad (22)$$

mit:

$$\begin{aligned} n_{\min,GT+SV} &= \text{Mindestkollektivgröße } U(P) \\ x &= \text{Anzahl } U(GT+SV)/100 \text{ } U(P) \\ a, b &= \text{Funktionsparameter} \end{aligned}$$

Die Funktionsparameter a und b sind abhängig von der gewünschten bzw. erreichbaren relativen Standardabweichung; im vorliegenden Fall sind bedingt durch das doch recht kleine Kollektiv 1.1 mit $n_{U(P)} = 179$ relative Standardabweichungen von 20 % erreichbar (vgl. Tabelle 14.6). Dies entspricht einer sogenannten „liberalen Variante“ für kleine Kollektive (H Uks, 2017). Zum Gewährleisten von relativen Standardabweichungen von 15 % bei angepassten Unfallkostensätzen für Unfälle der Kategorien 1 und 2 zusammen wäre ein Kollektiv mit $n_{U(P)} = 275$ erforderlich. Die Berechnung angepasster Unfallkostensätze für Unfälle mit schwerem Personenschaden ($aKS_{U(SP)}$) für das Kollektiv 1.1 kann somit gemäß Formel (23) in Anlehnung an die H Uks erfolgen.

| | Funktionsparameter für relative Standardabweichung von 20 % | | x | Ergebnis |
|---------------------------|---|--------|------------------------|-------------------------------------|
| | a | b | | Mindestkollektivgröße |
| Parameter für Formel (21) | 25.630 | -0,953 | 11,2 U(GT)/1.000 U(P) | $n_{\min,GT} = 2.478 \text{ U(P)}$ |
| Parameter für Formel (22) | 190 | -2,62 | 13,4 U(GT+SV)/100 U(P) | $n_{\min,GT+SV} = 154 \text{ U(P)}$ |

Tabelle 14.6: Berechnung der Mindestkollektivgrößen gemäß H Uks (2017)

$$aKS_{U(SP)} = \frac{n_{GT} \cdot KS_{GT} + n_{SV} \cdot KS_{SV} + n_{LV,U(SP)} \cdot KS_{LV}}{n_{U(SP)}} + \frac{n_{U(GT)} \cdot KS_{S,U(GT)} + n_{U(SV)} \cdot KS_{S,U(SV)}}{n_{U(SP)}} \quad (23)$$

mit:

- n_{GT} = Anzahl der getöteten Verkehrsteilnehmer bei allen U(SP)
- KS_{GT} = Kostensatz für Getötete [EUR]
- n_{SV} = Anzahl der schwerverletzten Verkehrsteilnehmer bei allen U(SP)
- KS_{SV} = Kostensatz für Schwerverletzte [EUR]
- $n_{LV,U(SP)}$ = Anzahl der leichtverletzten Verkehrsteilnehmer bei allen U(SP)
- KS_{LV} = Kostensatz für Leichtverletzte [EUR]
- $n_{U(GT)}$ = Anzahl der Unfälle mit Getöteten (Unfallkategorie 1)
- $KS_{S,U(GT)}$ = Sachschadens-Kostensatz für Unfälle mit Getöteten [EUR]
- $n_{U(SV)}$ = Anzahl der Unfälle mit Schwerverletzten (Unfallkategorie 2)
- $KS_{S,U(SV)}$ = Sachschadens-Kostensatz für Unfälle mit Schwerverletzten [EUR]
- $n_{U(SP)}$ = Anzahl der Unfälle mit schwerem Personenschaden (Kat. 1 und Kat. 2)

Analog können angepasste Unfallkostensätze für Unfälle mit Leichtverletzten ($aKS_{U(LV)}$) berechnet werden, da konkrete Angaben für das Unfallkollektiv 1.1 vorliegen. Hierbei ist es jeweils erforderlich, jahreseinheitliche Kostensätze anzuwenden. Durch die Aktualisierung der Berechnungsmethode ergeben sich für die jüngere Vergangenheit (Stand 2004 bzw. 2005) zwei unterschiedliche Preisstände (vgl. BAUM ET AL., 2010). Als Fazit dieser Ausführungen finden die an das vorliegende Kollektiv angepassten Unfallkostensätze auf Basis der Berechnungsmethode, Preisstand 2005 gemäß BAUM ET AL. (2010) in dieser Arbeit Anwendung (vgl. Tabelle 4.2).

| | $aKS_{U(SP)}$ (für Unfälle der Kat. 1 bzw. 2) | $aKS_{U(LV)}$ (für Unfälle der Kat. 3) | $KS_{U(SS)}$ (für Unfälle der Kat. 4 bzw. 6) | $KS_{U(LS)}$ (für Unfälle der Kat. 5) |
|---|---|--|--|---|
| angepasste Unfallkostensätze bzw. Kostensätze für Sachschadensunfälle mit Preisstand 2005 [EUR], gerundet, gemäß BAUM ET AL. (2010) | 210.724 | 17.353 | 17.884 | 5.278 |

Tabelle 14.7: Berechnungsergebnis für angepasste Unfallkostensätze für das Kollektiv 1.1 sowie Kostensätze für Sachschadensunfälle

14.4.5 Kritische Würdigung der (angepassten) Unfallkostensätze

Es ist auffällig, aber infolge der durchgeführten Unfallauswertung nicht verwunderlich, dass das vorliegende Kollektiv nur sehr wenige Unfälle mit schwerem Personenschaden aufweist. Dies hat allerdings zur Folge, dass die Unfallkostenkennwerte von Anlagen, die auch nur einen solchen Unfall vorweisen können, besonders hervorstechen. Es bedürfte über zehn Unfällen der Kategorien 3, 4 oder 6, um einen Unfall der Kategorie 1 oder 2 „aufzuwiegen“. Daher ist – auch bei den verwendeten, angepassten Unfallkosten – der Einsatz von Unfallkostensätzen gerade bei so kleinen Kollektiven und einer kleinteiligen (wie im vorliegenden Falle der zufahrtsgenauen) Betrachtung grundsätzlich kritisch zu sehen, da sehr starke Verzerrungen oder übermäßige Hervorhebungen durch – möglicherweise zufällige – Einzelereignisse geschehen können. Unfallkostenraten UKR werden daher, sofern sie überhaupt substantiell betrachtet werden, nur als Zusatz zu Betrachtungen der Unfallraten hinzugezogen.

14.5 Übersicht über das Gesamtunfallgeschehen (Kollektiv 1.1)

Um das ungefilterte Gesamtunfallgeschehen an Kreisverkehren nicht außer Acht zu lassen, wird im Rahmen einer Vergleichsuntersuchung an allen Kreisverkehren jeweils der „ganze“ Knotenpunkt mit dem relevanten Gesamtunfallgeschehen betrachtet. Hierfür werden alle Unfälle auf der Fahrbahn des Kreisverkehrs und der direkt angeschlossenen Straßen ausgewertet, nicht jedoch Unfälle auf umlaufenden Radwegen oder in direkt nachfolgenden Einmündungen anderer Straßen und Wege (aber inkl. von Wegen, die über Fahrbahnteiler geführt

werden, i.d.R. Radwege) etc.; dieses umfangreichere Kollektiv ist das „Kollektiv 1.1“ (vgl. Bild 14.5).

Beim Vergleich fällt auf, dass das Kollektiv 1.1 insbesondere über mehr Fahrurfälle verfügt – relativ und insgesamt gesehen (vgl. Bild 14.6). Insgesamt sind es 119 Unfälle mehr, ein Anstieg um rund 75 % bzw. rund 62 % aller zusätzlichen Unfälle. Erkennbar sind mehrere typische Unfallmuster für diese Fahrurfälle:

- Alleinunfälle vor allem von Zweiradfahrern, die die Kontrolle über Ihr Fahrzeug verlieren, tlw. ohne erkennbaren Zusammenhang zum Kreisverkehr. Hierunter fallen auch alleinbeteiligt stürzende Zweiradfahrern (z.B. infolge Ölspur oder Nässe).
- Fast zwei Drittel der Fahrurfälle nach der Kreisausfahrt sind Alleinunfälle.

Insgesamt geschehen von den über 190 zusätzlichen Unfällen des Kollektives 1.1 fast die Hälfte im Zuge der Fahrt auf der Kreisfahrbahn. Weiterhin sind Zusammenstöße zweier Pkw zu verzeichnen (etwa durch Rückstau an einer durch Querverkehr blockierten Ausfahrt). Weitere Unfälle wie Ladungsverluste etc. können nicht in einen Ursachenzusammenhang zur Anlage des Kreisverkehrs gestellt werden. Dies sind alles Unfälle, die für die vorliegende Fragestellung als nicht relevant angesehen werden.

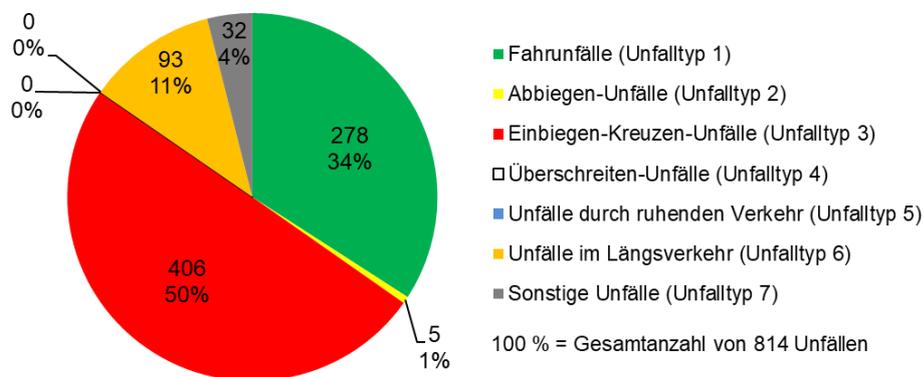


Bild 14.5: Absolute und relative Anteile aller Unfälle (Kollektiv 1.1)

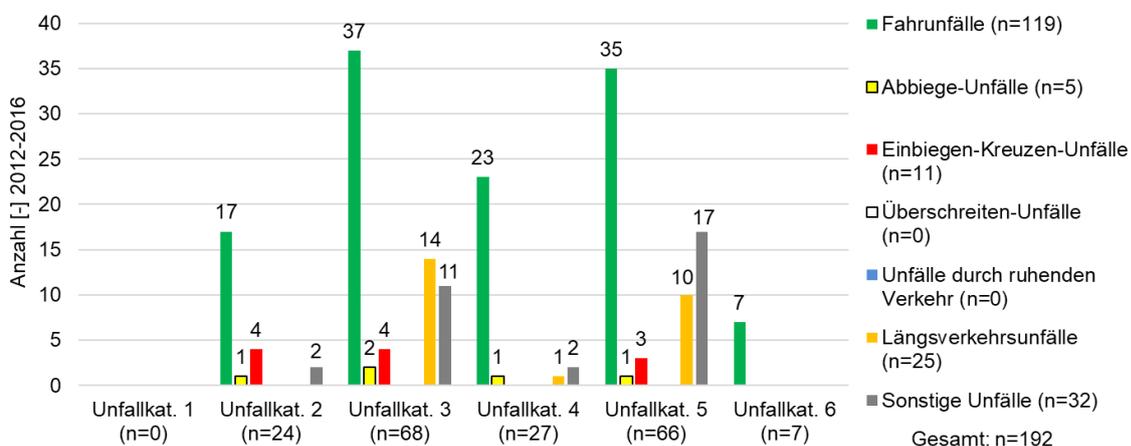


Bild 14.6: Im Kollektiv 1.1 im Vergleich zum hauptsächlich untersuchten Kollektiv 1.2 zusätzlich enthaltene Unfälle

Insgesamt ist die Verteilung aller Unfälle (Bild 4.13 im Vergleich zu Bild 14.5 bzw. Bild 14.7) nicht auffällig abweichend, es dominieren EK-Unfälle vor Fahrurfällen und Längsverkehrsunfällen. Es wird deutlich, dass auch die Verteilung der Unfallkategorien (Bild 4.14 im Vergleich

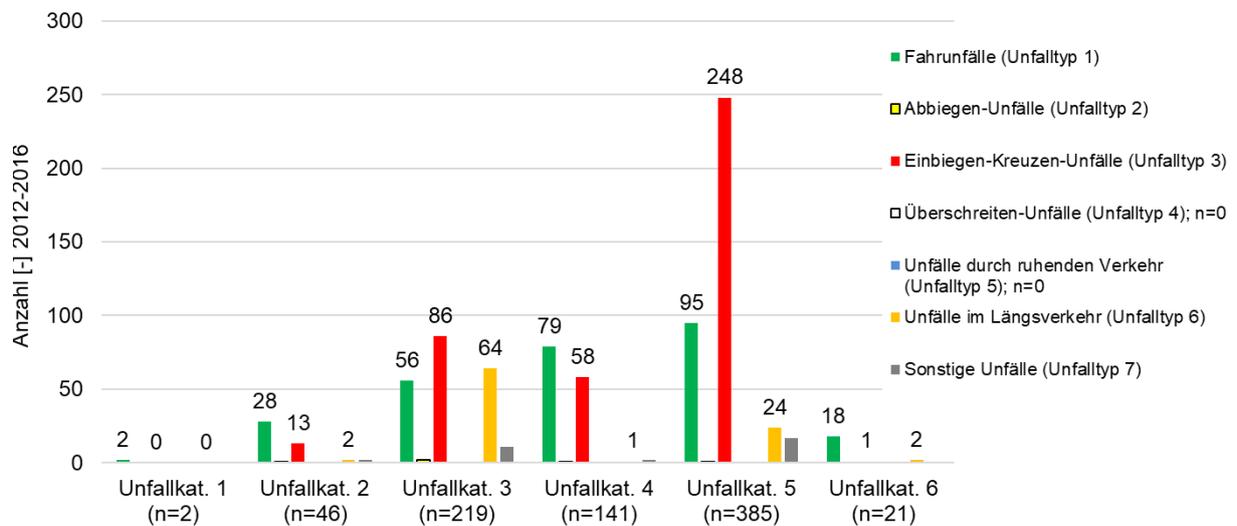


Bild 14.7: Verteilung aller Unfälle (Kollektiv 1.1) nach Unfalltyp und Unfallkategorie

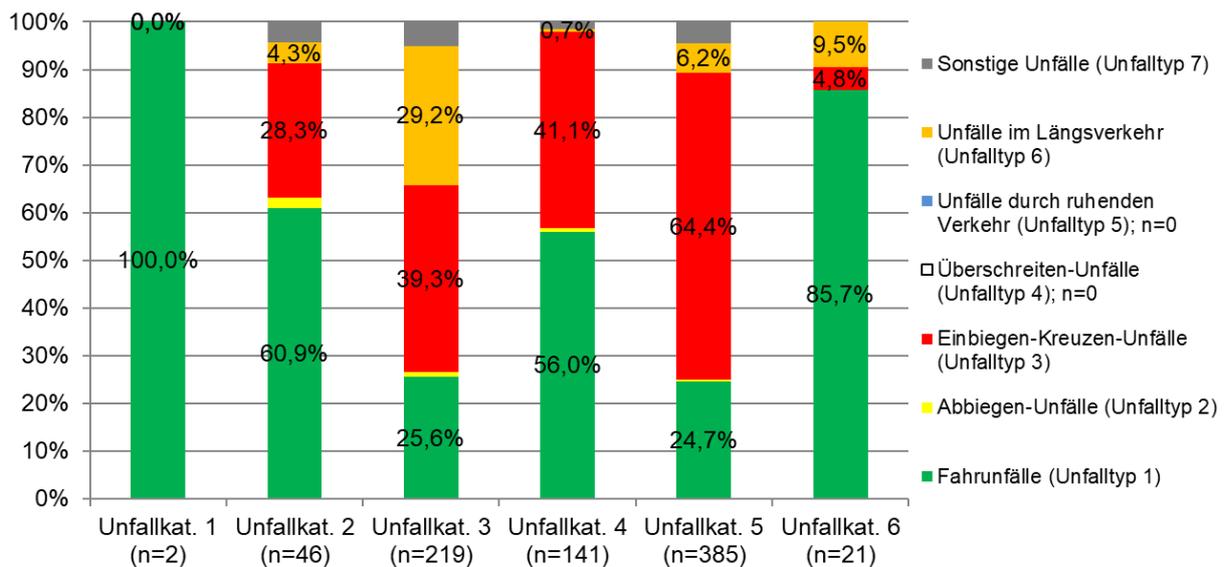


Bild 14.8: Prozentuale Verteilung aller Unfälle (Kollektiv 1.1) nach Unfalltyp und Unfallkategorie

zu Bild 14.8) ähnlich gestuft ist. Daraus wird abgeleitet, dass eine systematische Sicherheitsbetrachtung der Zu- und Einfahrbereiche von Kreisverkehren durch das Kollektiv 1.2 sichergestellt ist.

14.6 Unfallschwererstruktur von Kollektiv 1.2

| Unfall- kategorie | Unfalltypen | | | | | | Summe je Un- fallka- tegorie | Anteil davon Utyp1 | Anteil davon Utyp3 | Anteil davon Utyp6 |
|---|---------------|--------|---------------|--------|--------------|--------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | 1 | | 3 | | 6 | | | | | |
| | Anz. | Anteil | Anz. | Anteil | Anz. | Anteil | | | | |
| 1 | 2 | 1,3 % | 0 | 0,0 % | 0 | 0,0 % | 2 | 100,0 % | 0,0 % | 0,0 % |
| 2 | 11 | 6,9 % | 9 | 2,2 % | 2 | 2,9 % | 22 | 50,0 % | 40,9 % | 9,1 % |
| 3 | 19 | 12,0 % | 83 | 20,9 % | 52 | 74,3 % | 154 | 12,3 % | 53,9 % | 33,8 % |
| 4 | 56 | 35,2 % | 58 | 14,6 % | 0 | 0,0 % | 114 | 49,1 % | 50,9 % | 0,0 % |
| 5 | 60 | 37,7 % | 246 | 62,0 % | 14 | 20,0 % | 320 | 18,8 % | 76,9 % | 4,4 % |
| 6 | 11 | 6,9 % | 1 | 0,3 % | 2 | 2,9 % | 14 | 78,6 % | 7,1 % | 14,3 % |
| Summe je Unfalltyp | 159 (100,0 %) | | 397 (100,0 %) | | 70 (100,0 %) | | 626 | | | |
| Anteil am Gesamtunfall- geschehen je Unfalltyp | 25,4 % | | 63,4 % | | 11,2 % | | Abweichungen zur Summe von jeweils 100 % durch Rundungen möglich | | | |

Tabelle 14.8: Übersicht über die Unfallschwererstruktur von Kollektiv 1.2

14.7 Unfallmerkmal Alkoholkonsum

An Kreisverkehren geschehen etwa 10 % der Unfälle infolge von Alkohol- oder Drogeneinfluss. Auffällig ist hierbei der Anteil der Fahrurfälle: Während fast 84 % der Unfälle unter Alkohol- bzw. Drogeneinfluss Fahrurfälle sind, weist innerhalb der Fahrurfälle fast ein Drittel dieses Merkmal auf! Hervorzuheben ist weiterhin, dass beide Unfälle mit Todesfolge (Kategorie 1) und 4 der 11 Unfälle mit Schwerverletzten (Kategorie 2) innerhalb der Fahrurfälle hierzu gehören (vgl. Bild 14.9).

Würden die Unfälle mit dem Merkmal „Alkohol“ des Unfallverursachers dem Kollektiv 1.2 entnommen, entstünde die in Bild 14.10 in hellerer Farbe gezeigte Verteilung. Die Tendenz, dass Fahrurfälle eher schwere Unfälle (verbleibende Kategorien 1, 2 und 4) aufweisen, wäre hierbei etwas weniger stark ausgeprägt. Gleichzeitig verbleibt immer noch ein recht hoher prozentualer Anteil an Unfällen der Kategorie 2 und besonders der Kategorie 4 (schwerer Sachschaden) bei den Fahrurfällen.

Da sich die Tendenzen bzw. Abstufungen innerhalb des Typs Fahrurfälle jedoch insgesamt stark entsprechen und zu bedenken ist, dass auch durch Unfälle unter Alkoholeinfluss mögliche Indizien für Entwurfsdefizite zu Tage treten können, wird grundsätzlich mit dem vollständigen Datensatz unter Einbezug der Unfälle mit dem Merkmal „Alkohol“ gearbeitet.

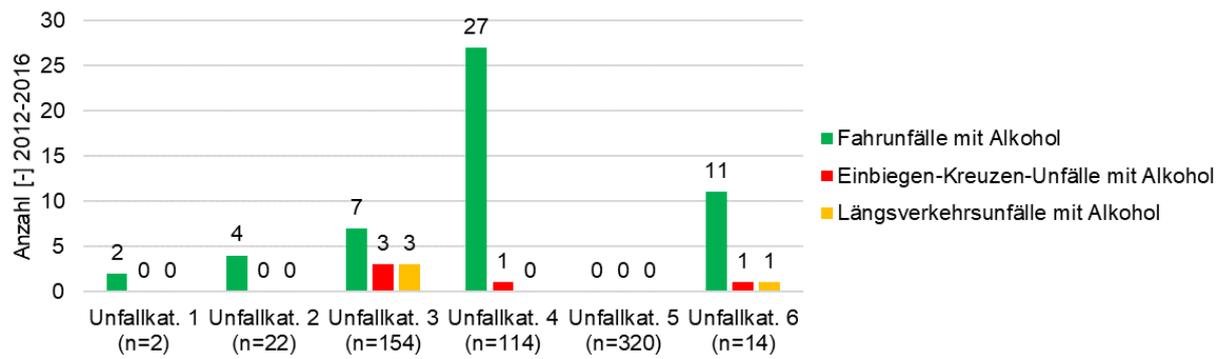


Bild 14.9: Alle Unfälle mit Unfallmerkmal „Alkohol“ im Kollektiv 1.2 unter Angabe der Gesamtunfallzahlen je Unfallkategorie

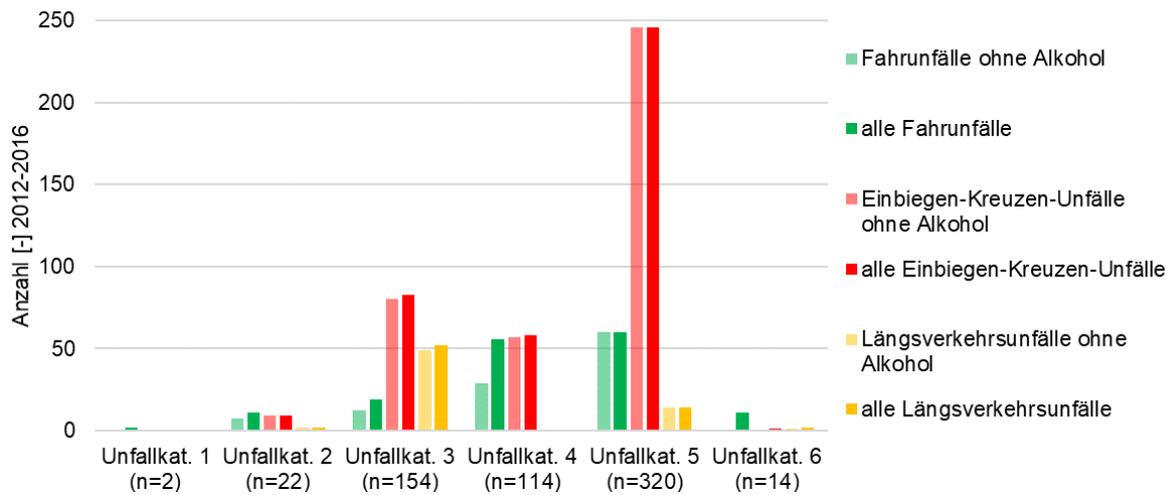
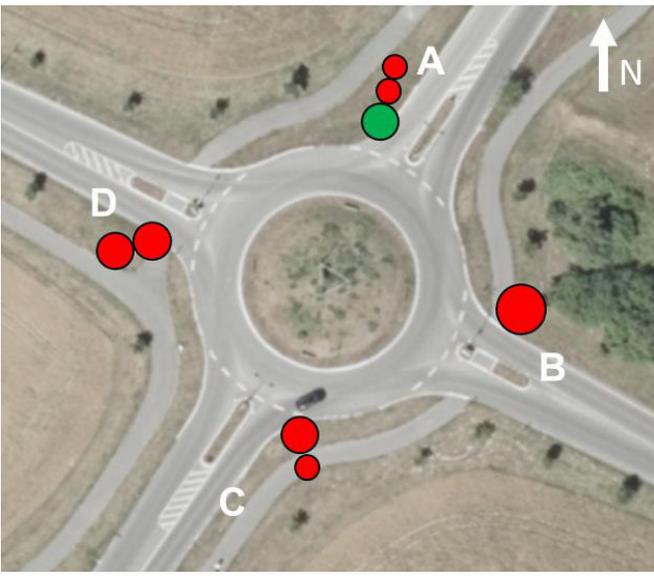
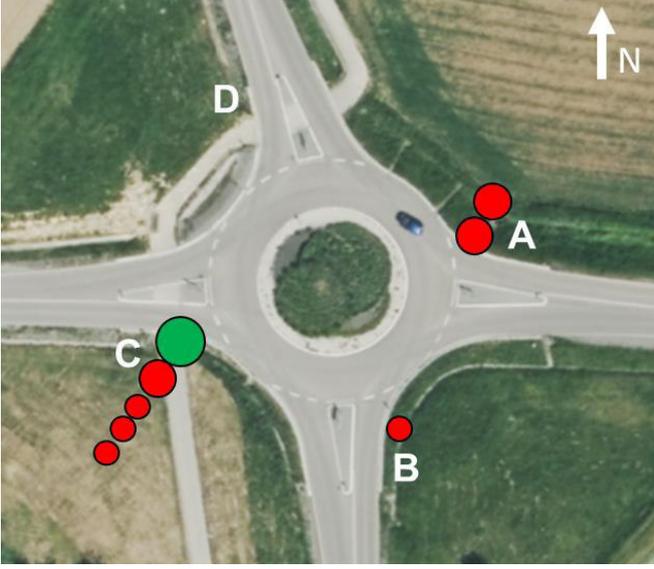
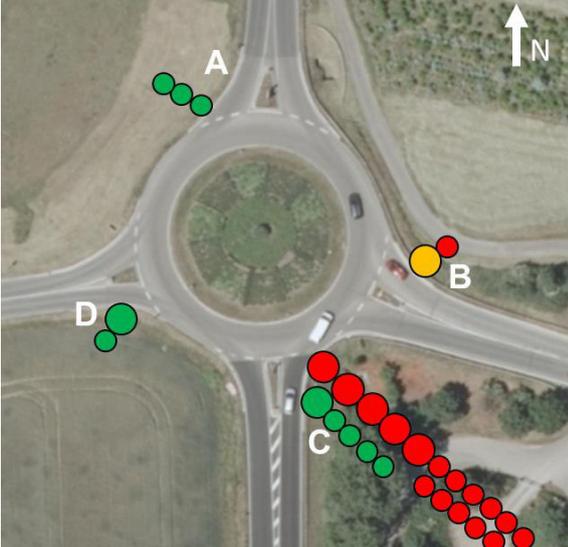
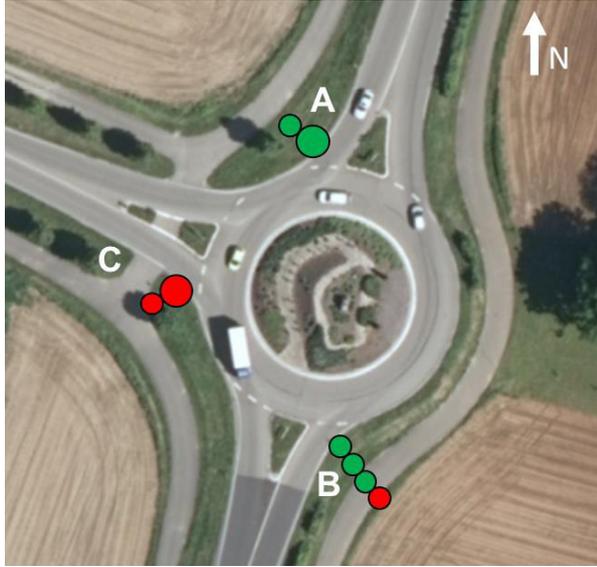
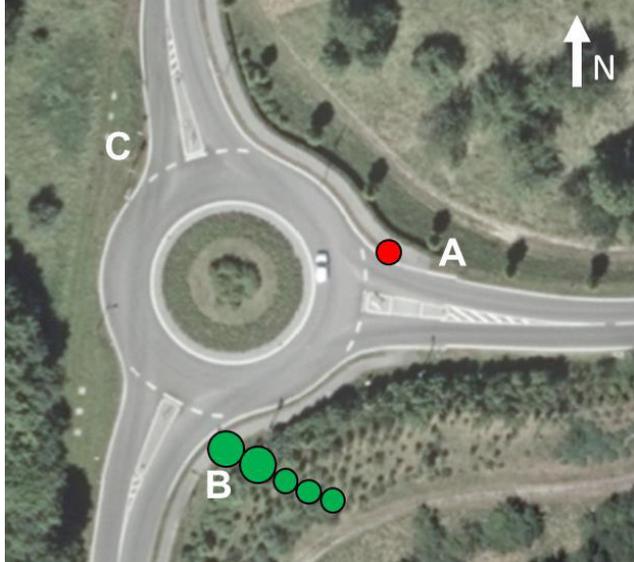


Bild 14.10: Differenzierte Darstellung aller Unfälle mit bzw. ohne Unfallmerkmal „Alkohol“

14.8 Übersicht über Kreisverkehre und Unfälle im Kollektiv 1.4

| | |
|--|--|
| <p>Kreisverkehr (1) Karlsruhe-Neureut (interne Nr. 131)</p> <p>KU₂₀₀-Eigenschaften der sinn- gemäßen Geradeaus-Richtun- gen, gerundet:</p> <p>131AC: 24 gon/10m 131BD: 24 gon/10m 131CA: 24 gon/10m 131DB: 24 gon/10m</p> |  |
| <p>Kreisverkehr (2) Flehingen-Luisenhof (interne Nr. 112)</p> <p>KU₂₀₀-Eigenschaften der sinn- gemäßen Geradeaus-Richtun- gen, gerundet:</p> <p>112AC: 24 gon/10m 112BD: 24 gon/10m 112CA: 16 gon/10m 112DB: 16 gon/10m</p> |  |
| <p>Kreisverkehr (3) Ubstadt-Weiher (interne Nr. 119)</p> <p>KU₂₀₀-Eigenschaften der sinn- gemäßen Geradeaus-Richtun- gen, gerundet:</p> <p>119AC: 32 gon/10m 119BD: 40 gon/10m 119CA: 32 gon/10m 119DB: 8 gon/10m</p> |  |

| | |
|---|--|
| <p>Kreisverkehr (4) Ringsheim (interne Nr. 553)</p> <p>KU₂₀₀-Eigenschaften der sinn- gemäßen Geradeaus-Richtun- gen, gerundet: 553AB: 23 gon/10m 553BA: 23 gon/10m</p> |  |
| <p>Kreisverkehr (5) Pfinztal-Söllingen (interne Nr. 116)</p> <p>KU₂₀₀-Eigenschaften der sinn- gemäßen Geradeaus-Richtun- gen, gerundet: 116BC: 41 gon/10m 116CB: 0 gon/10m</p> |  |
| <p>Legende</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Farbe: Unfalltyp 1 (Fahrerunfall) Symbolgröße: Kategorie 2, Unfall mit Schwerverletzten ● Farbe: Unfalltyp 6 (Unfall im Längsverkehr) Symbolgröße: Kategorie 3, Unfall mit Leichtverletzten ● Farbe: Unfalltyp 3 (Einbiegen-Kreuzen-Unfall) Symbolgröße: Kategorie 5, sonstiger Unfall mit Sachschaden |
| <p>Anmerkungen</p> | <p>Der Unfallbezug ist jeweils auf die Zufahrt gelegt, aus der der Unfallverursacher eingefahren ist</p> <p>Quellen der zugrundeliegenden Luftbilder: jeweils LUBW-Online-Kartendienst, 2019</p> |

14.9 Geschwindigkeitsverlaufslinien der Kreisverkehre

14.9.1 Allgemeines

Die nachfolgenden Diagramme zeigen linienhaft den Verlauf der Geschwindigkeit während der Fahrt durch den Kreisverkehr. Dabei werden nur geradeaus fahrende Fahrzeuge abgebildet und nur solche, die unbeeinflusst von anderen Fahrzeugen „frei fahren“ oder anderen Fahrzeugen „hinterher fahren“ (vgl. Kapitel 0). Die Lage des Nullpunktes der x-Achse entspricht dabei dem Schnittpunkt mit dem „10 m-Ring“ vor der Einfahrt, der Schnittpunkt mit dem Außenradius ist mit einem farbigen Strich-Symbol markiert. Die Bedeutung der Farben der Geschwindigkeitslinien bzw. des Symbols im Moment der Kreiseinfahrt zeigen Tabelle 14.9 und Tabelle 14.10. Die Reihenfolge der Diagramme entspricht den Geradeaus-Richtungen entsprechend der Arm-Bezeichnungen in Anlage 14.8 in alphabetischer Reihenfolge.

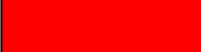
| Farbe der Geschwindigkeitslinien – Geschwindigkeit im Moment der Kreiseinfahrt (Schnittpunkt der Fahrlinie mit dem Außenradius) | |
|---|---|
| Geschwindigkeitsbereich [km/h] | Linienfarbe |
| [0; 10) |  |
| [10; 20) |  |
| [20; 25) |  |
| [25; 30) |  |
| [30; 35) |  |
| [35; ∞) |  |

Tabelle 14.9: Bedeutung der Farben der Geschwindigkeitslinien

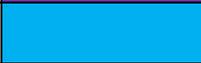
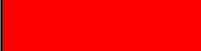
| Farben der Strich-Symbole im Moment der Kreiseinfahrt – Kurvigkeit im Fahrlineensegment 2 (vom ersten Wendepunkt WP1 bis zum zweiten Wendepunkt WP2) | |
|--|---|
| Kurvigkeitsbereich [gon/10m] | Symbolfarbe |
| $[-\infty; 7,5)$ |  |
| [7,5; 12,5) |  |
| [12,5; 17,5) |  |
| [17,5; 22,5) |  |
| [22,5; ∞) |  |

Tabelle 14.10: Bedeutung der Farben der Strich-Symbole im Moment der Kreiseinfahrt

14.9.2 Geschwindigkeitsverlaufslinien Kreisverkehr (1) Karlsruhe-Neureut

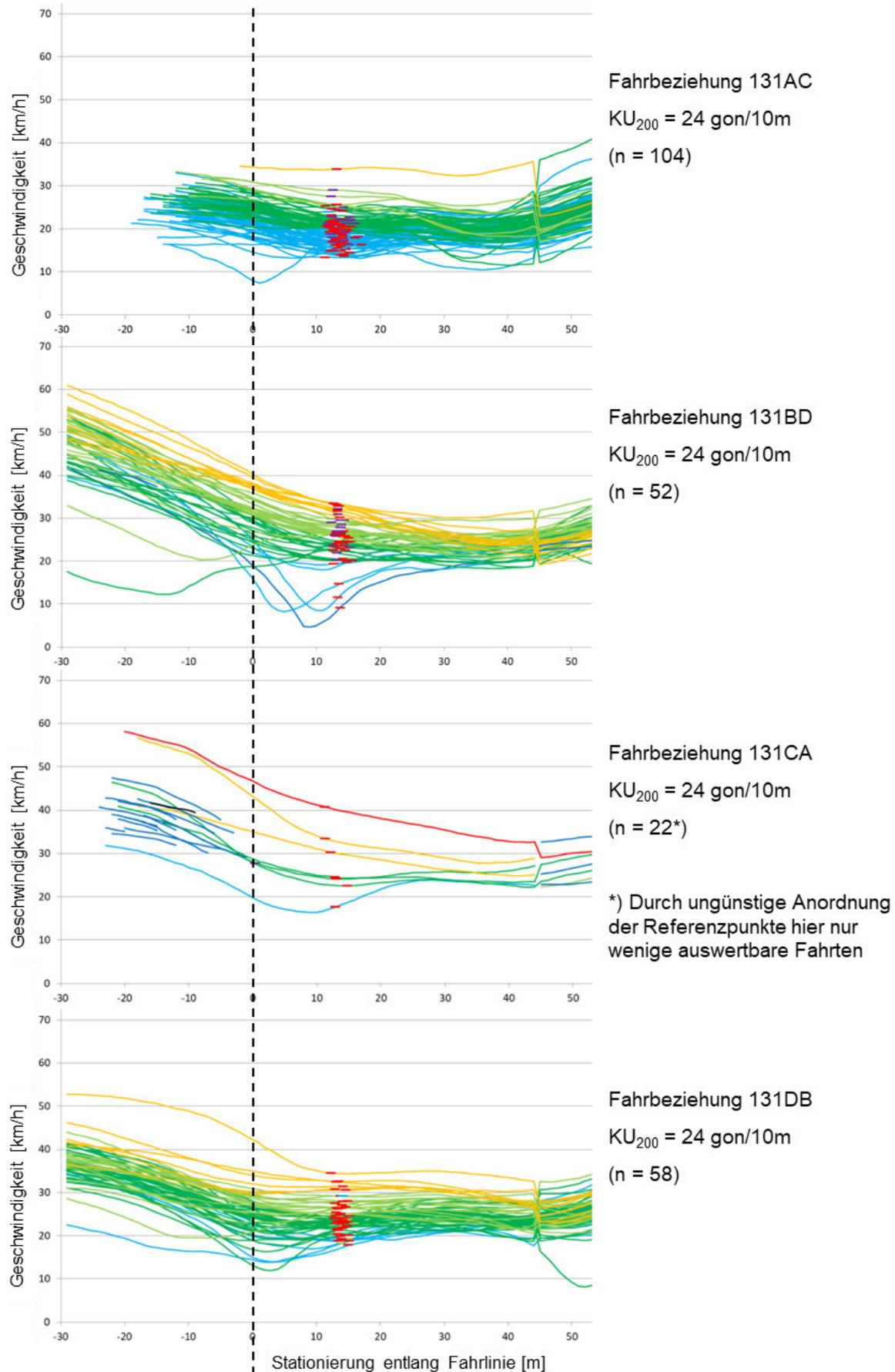


Bild 14.11: Geschwindigkeitsverlaufslinien am Kreisverkehr (1) Karlsruhe-Neureut; „frei fahrende“ Fahrzeuge

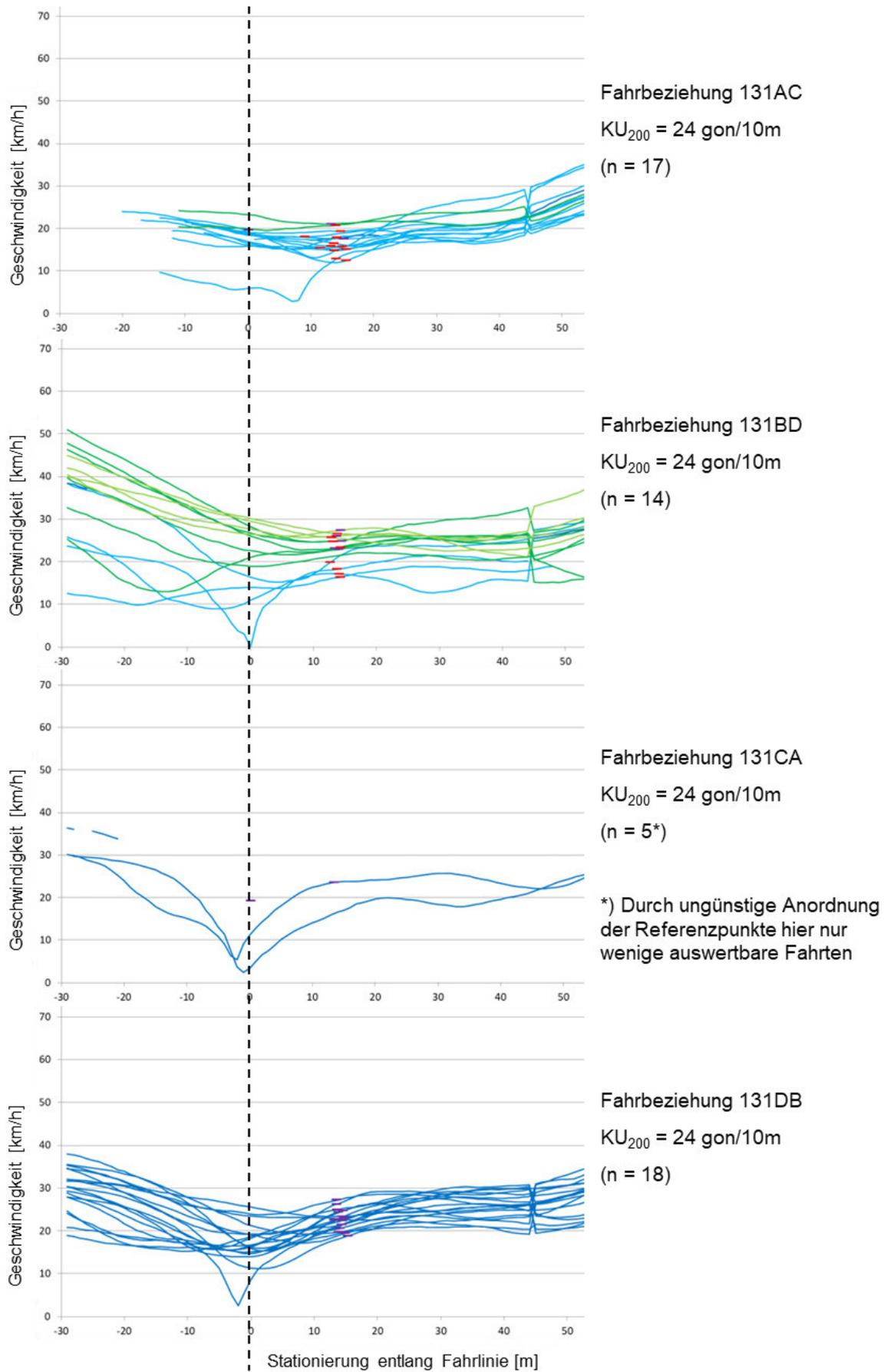


Bild 14.12: Geschwindigkeitsverlaufslinien am Kreisverkehr (1) Karlsruhe-Neureut; „hinterher fahrende“ Fahrzeuge

14.9.3 Geschwindigkeitsverlaufslinien Kreisverkehr (2) Flehingen-Luisenhof

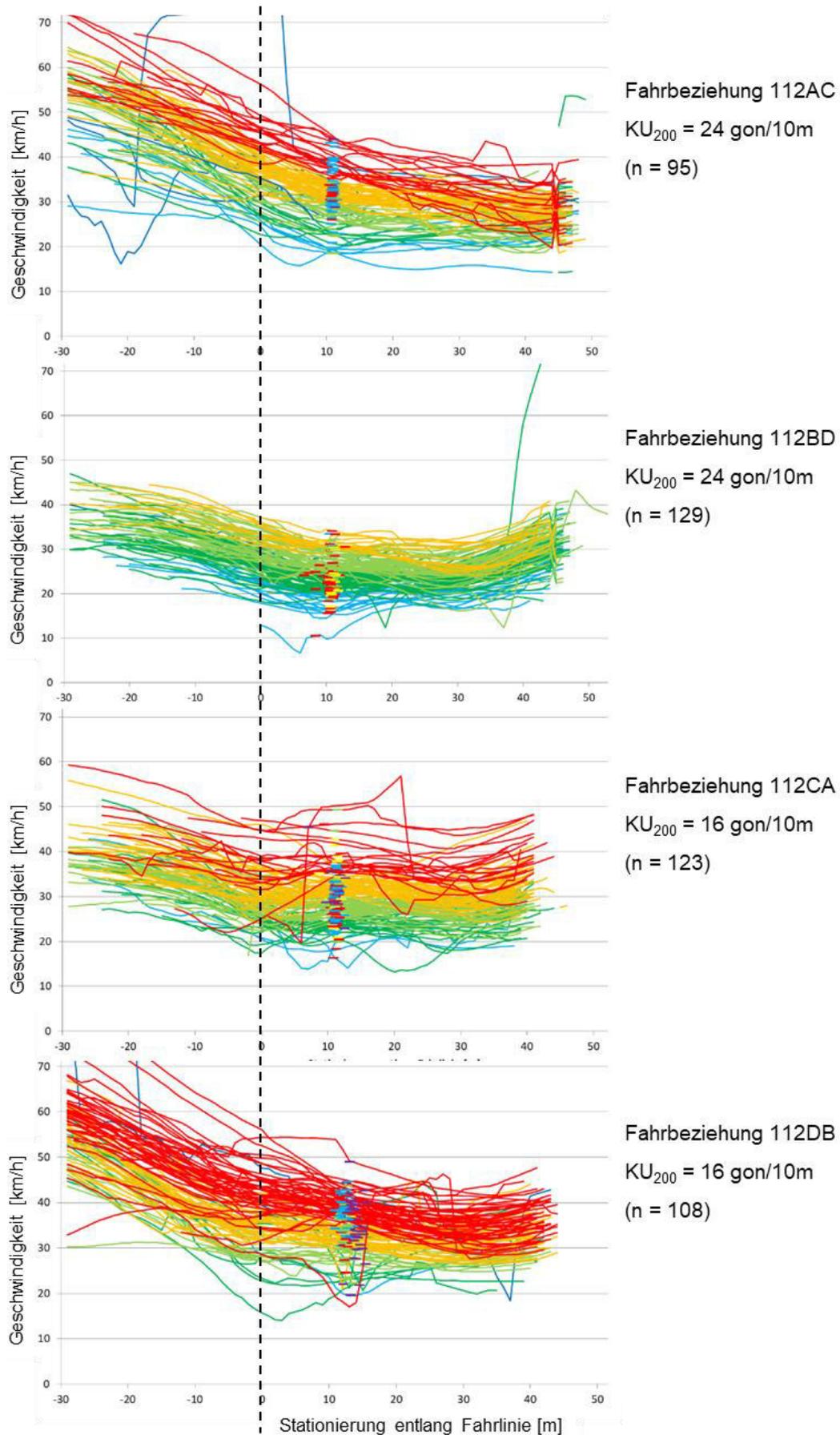


Bild 14.13: Geschwindigkeitsverlaufslinien am Kreisverkehr Luisenhof-Flehingen; „frei fahrende“ Fahrzeuge

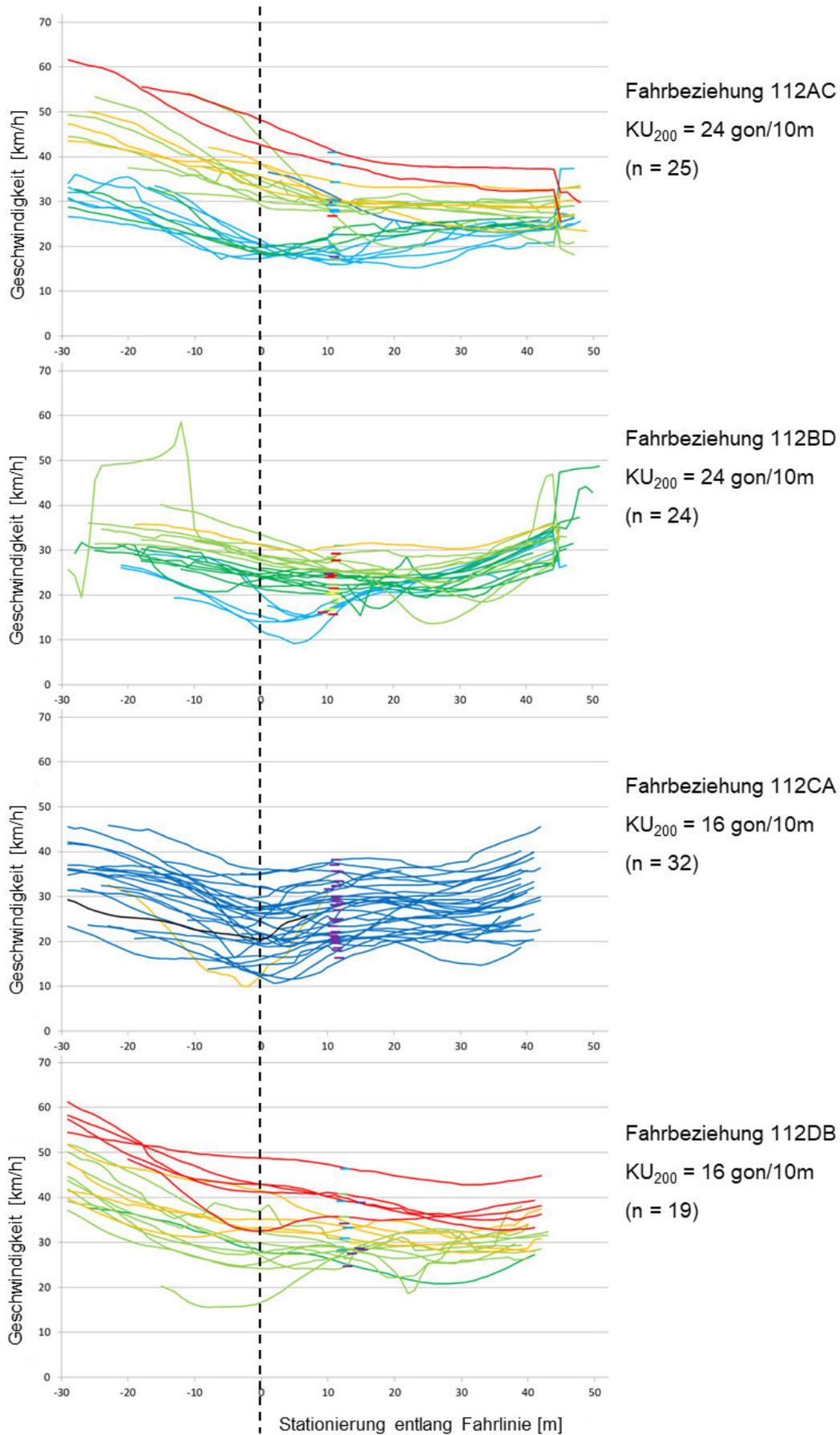


Bild 14.14: Geschwindigkeitsverlaufslinien am Kreisverkehr Luisenhof-Flehing; „hinterher fahrende“ Fahrzeuge

14.9.4 Geschwindigkeitsverlaufslinien Kreisverkehr (3) Ubstadt-Weiher

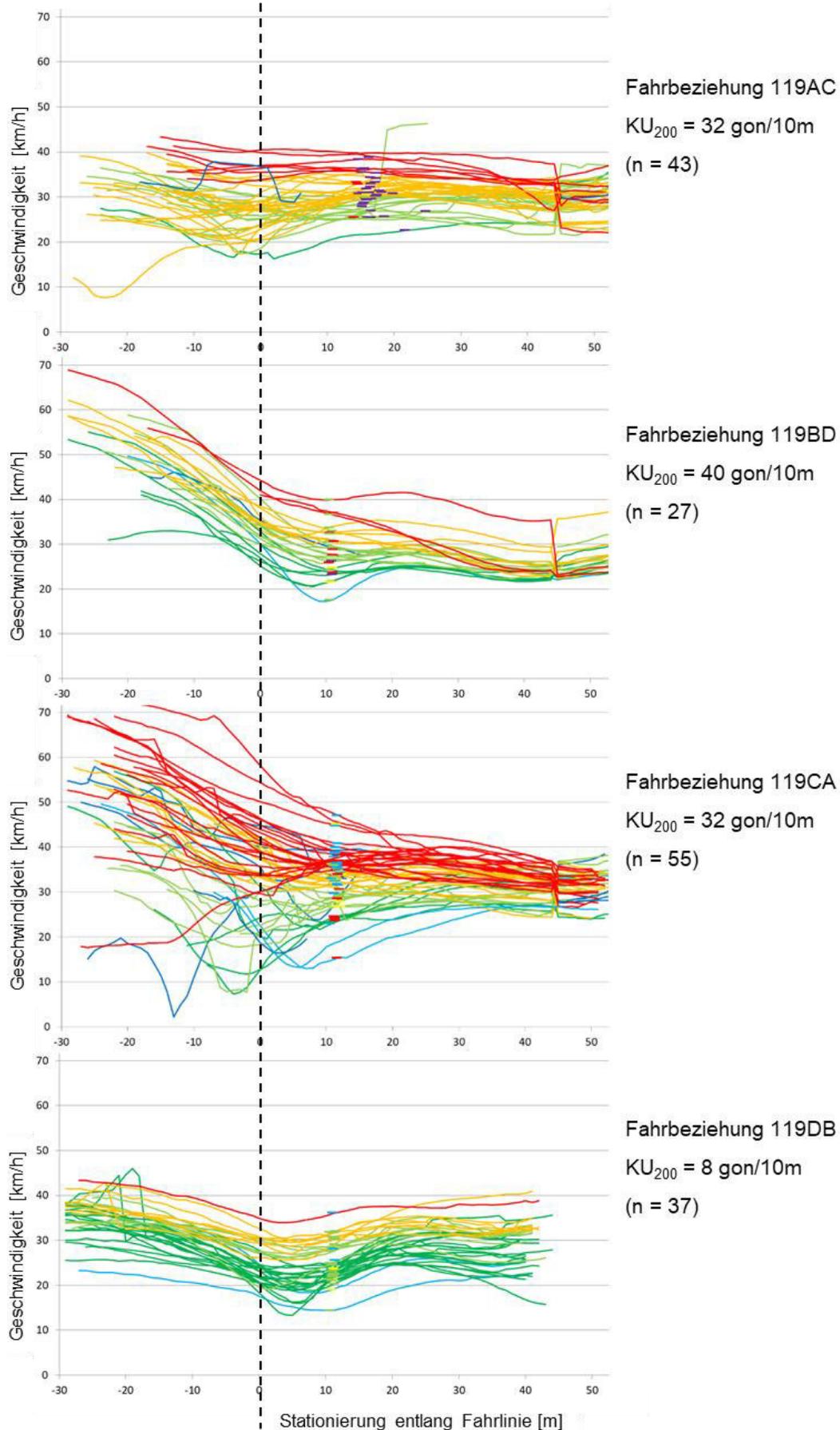


Bild 14.15: Geschwindigkeitsverlaufslinien am Kreisverkehr Ubstadt-Weiher; „frei fahrende“ Fahrzeuge

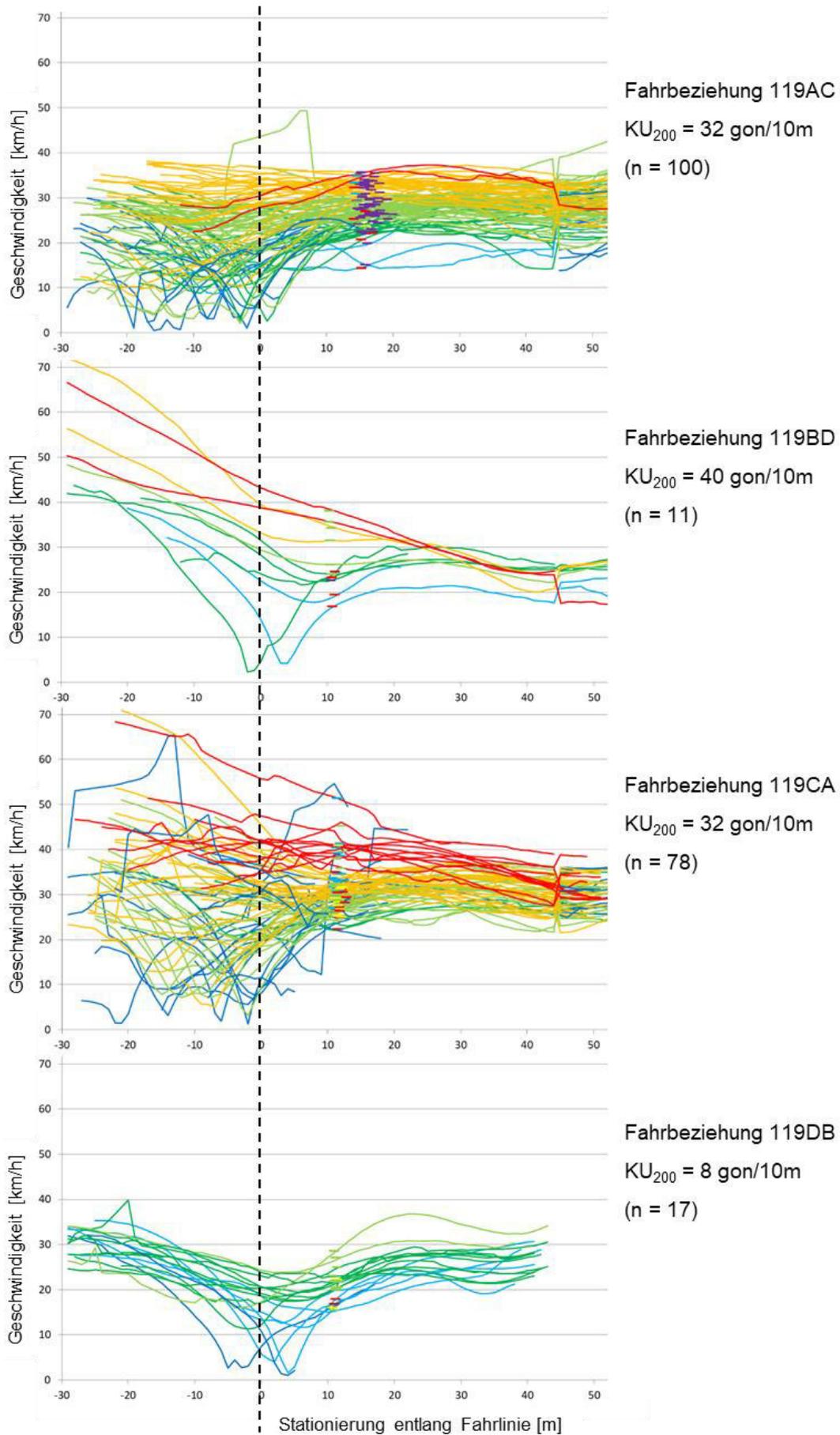


Bild 14.16: Geschwindigkeitsverlaufslinien am Kreisverkehr Ubstadt-Weiher; „hinterher fahrende“ Fahrzeuge

14.9.5 Geschwindigkeitsverlaufslinien Kreisverkehr (4) Ringsheim

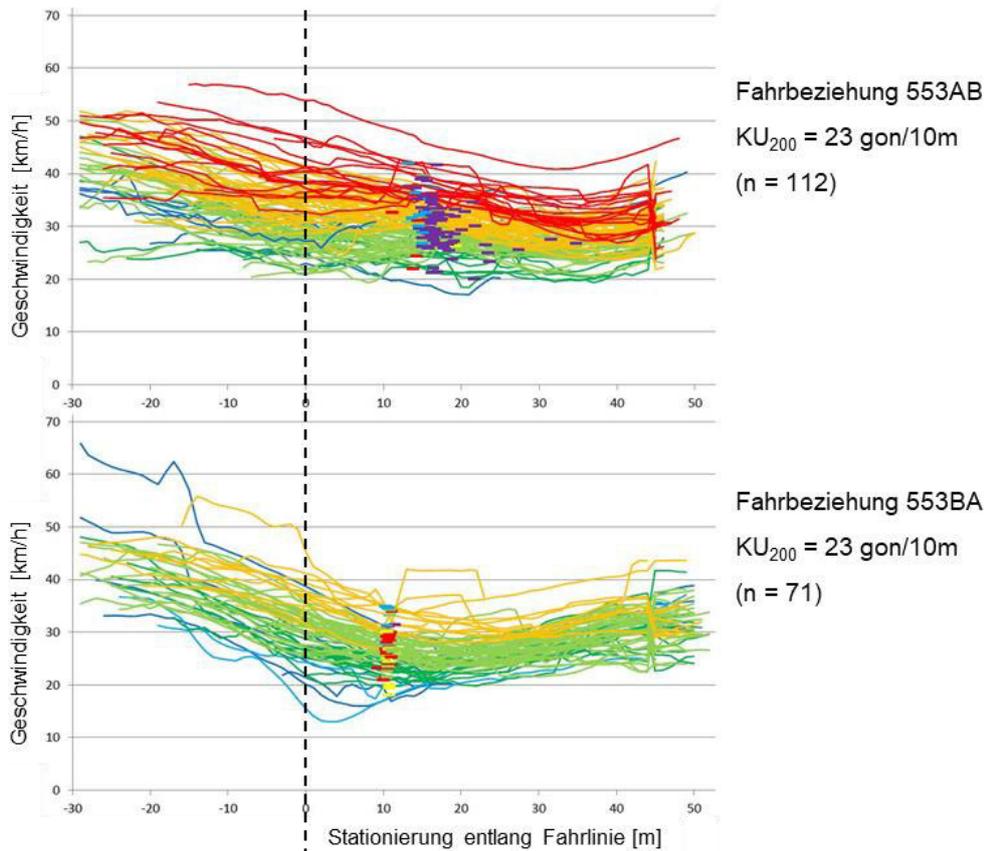


Bild 14.17: Geschwindigkeitsverlaufslinien am Kreisverkehr Ringsheim; „frei fahrende“ Fahrzeuge

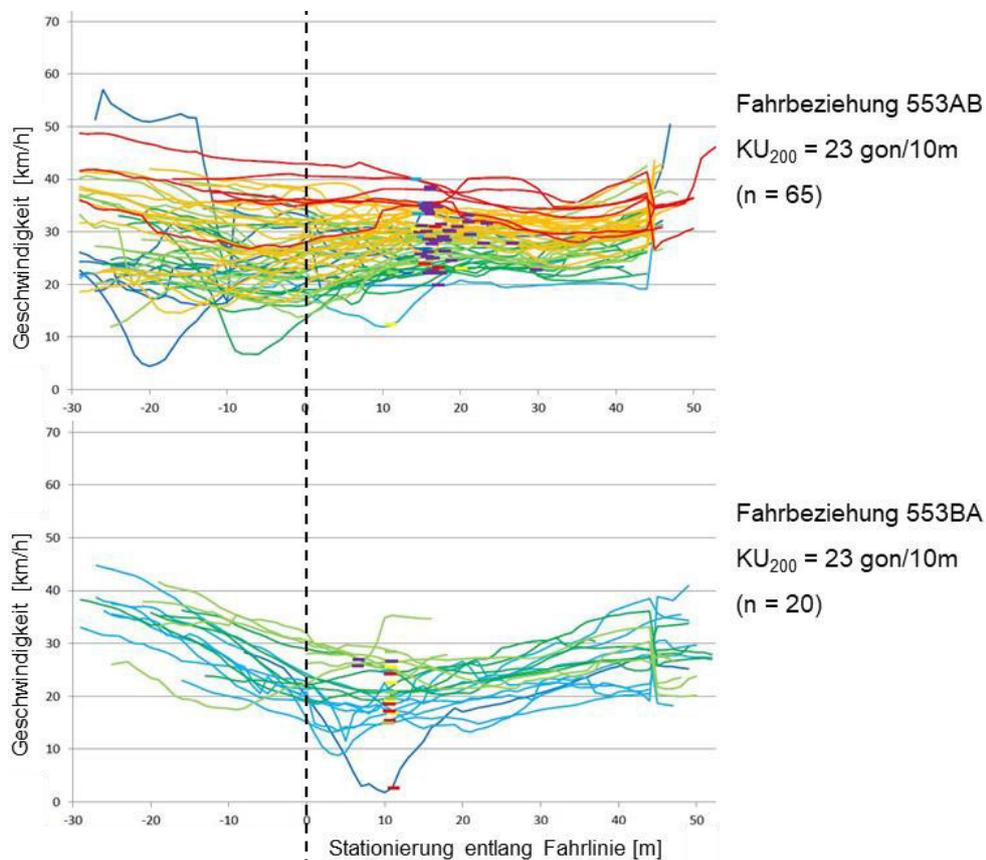


Bild 14.18: Geschwindigkeitsverlaufslinien am Kreisverkehr Ringsheim; „hinterher fahrende“ Fahrzeuge

14.9.6 Geschwindigkeitsverlaufslinien Kreisverkehr (5) Pfnztal-Söllingen

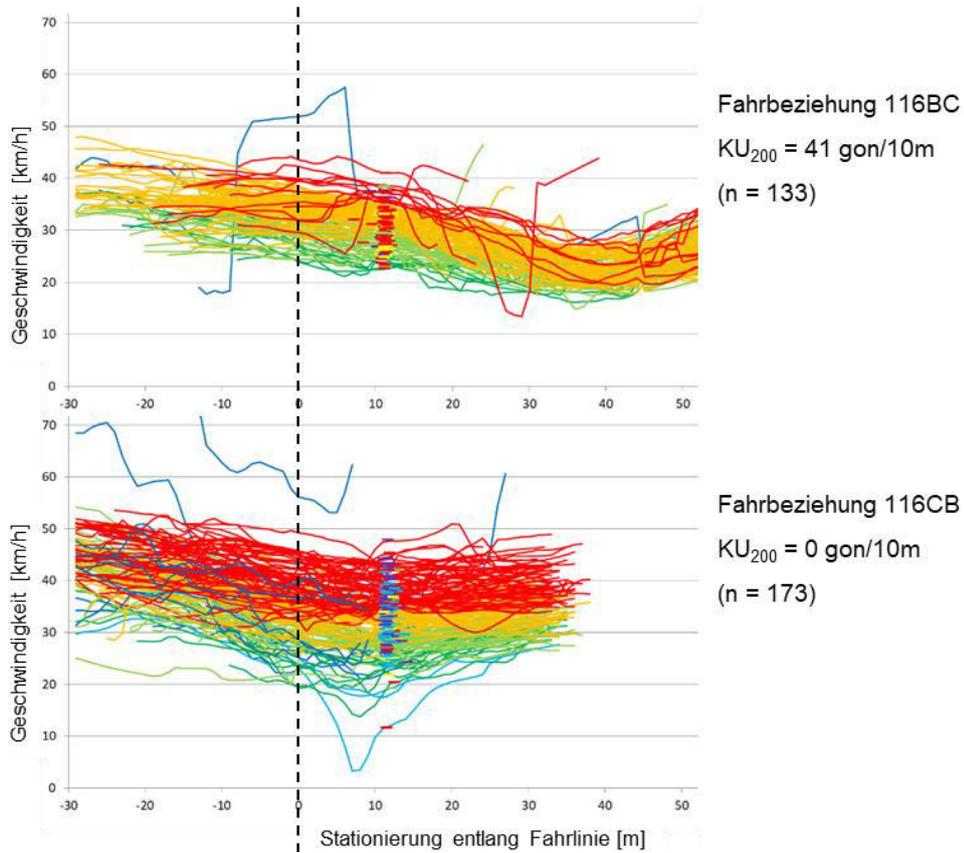


Bild 14.19: Geschwindigkeitsverlaufslinien am Kreisverkehr Pfnztal-Söllingen; „frei fahrende“ Fahrzeuge

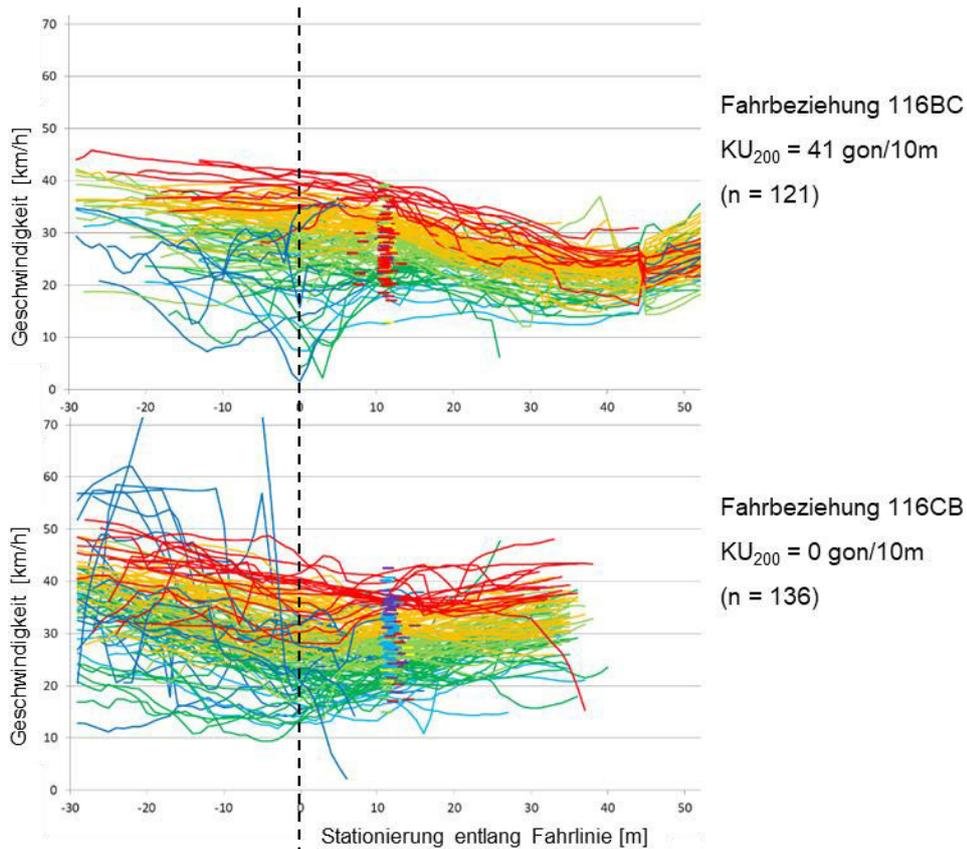


Bild 14.20: Geschwindigkeitsverlaufslinien am Kreisverkehr Pfnztal-Söllingen; „hinterher fahrende“ Fahrzeuge

14.10 Diagramme Geschwindigkeitsverhalten und Geometrie

14.10.1 Ausgewählte Entwurfparameter – lineare Regression

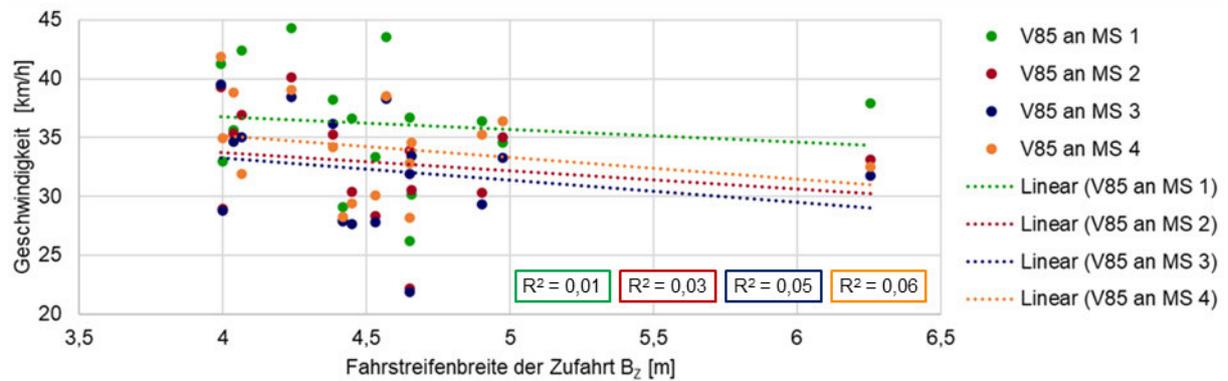


Bild 14.21: Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Fahrstreifenbreite der Zufahrt B_z

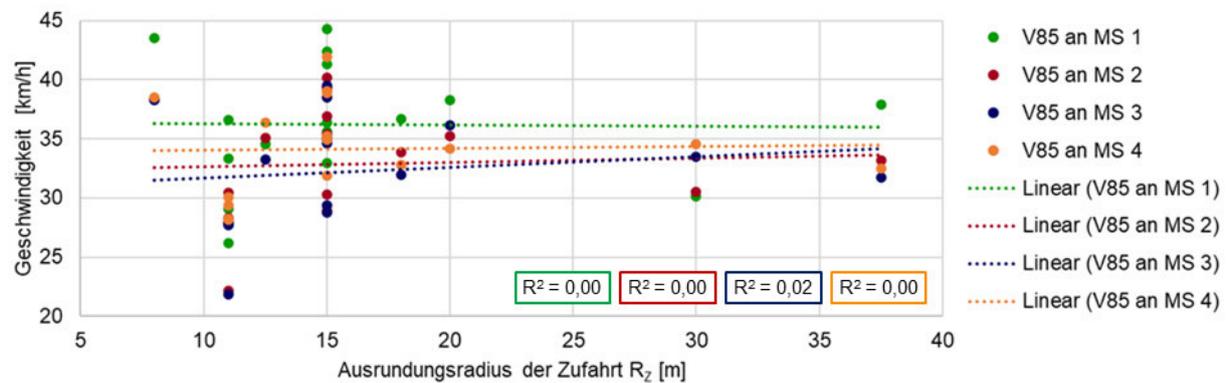


Bild 14.22: Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Ausradius der Zufahrt R_z

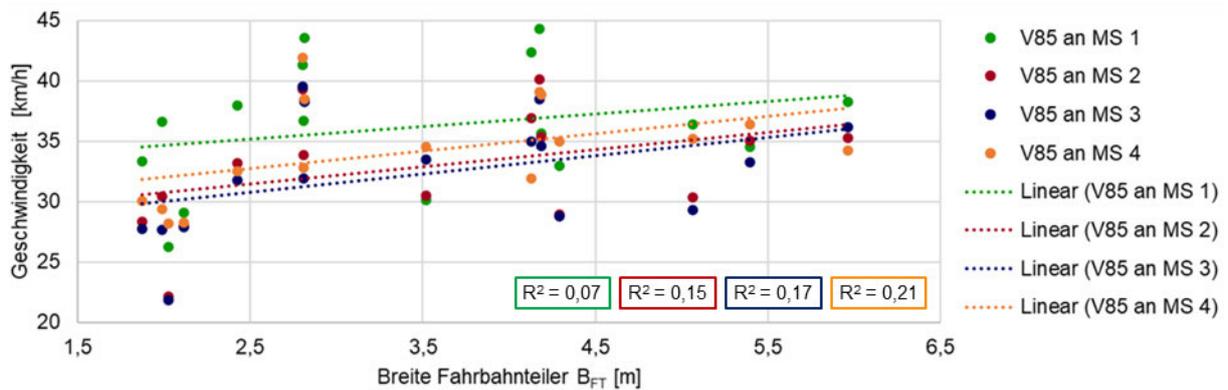


Bild 14.23: Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Breite des Fahrbahnteilers B_{FT}

14.10.2 Ausgewählte Entwurfparameter – quadratische Regression

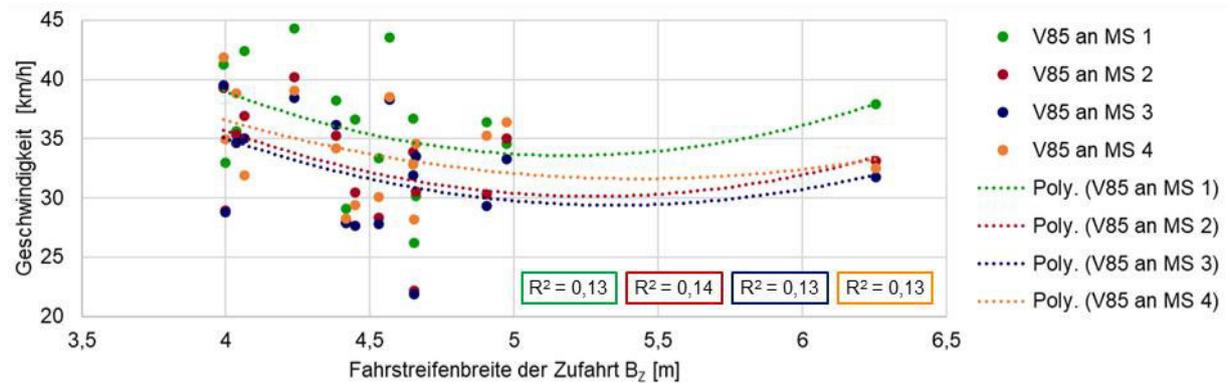


Bild 14.24: Quadratische Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Fahrstreifenbreite der Zufahrt B_z

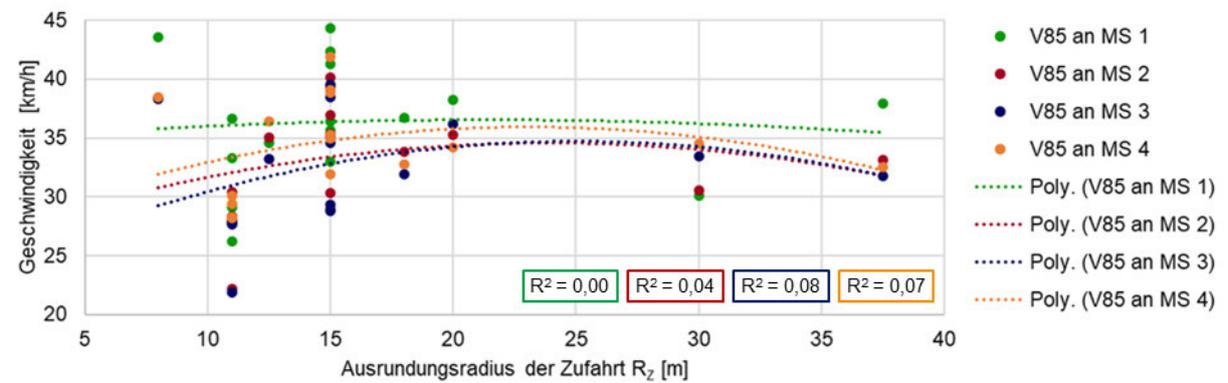


Bild 14.25: Quadratische Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Ausradius der Zufahrt R_z

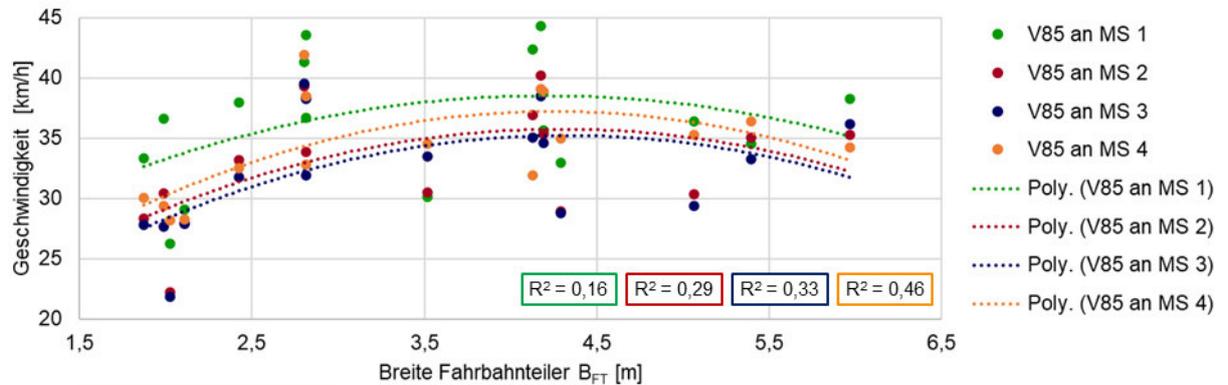


Bild 14.26: Quadratische Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Breite des Fahrbahnteilers B_{FT}

14.10.3 Ausgewählte Verhältnisparameter – lineare Regression

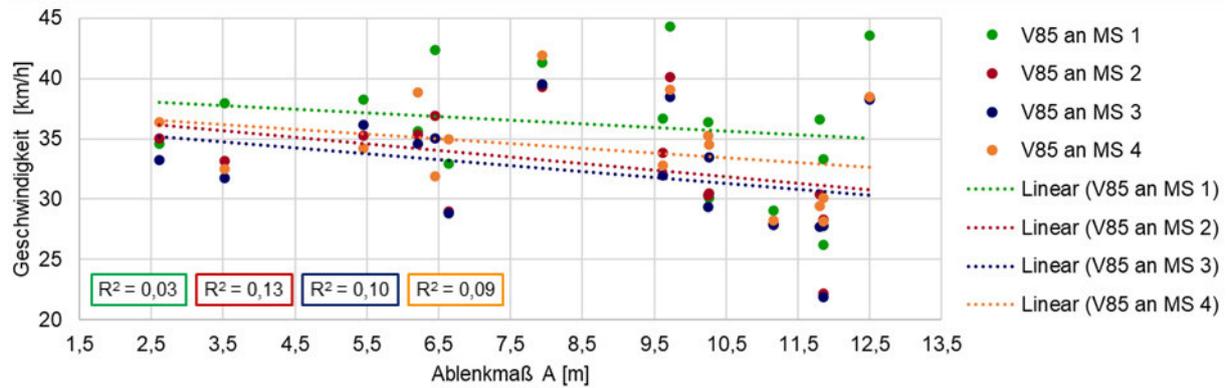


Bild 14.27: Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Ablenkmaß A

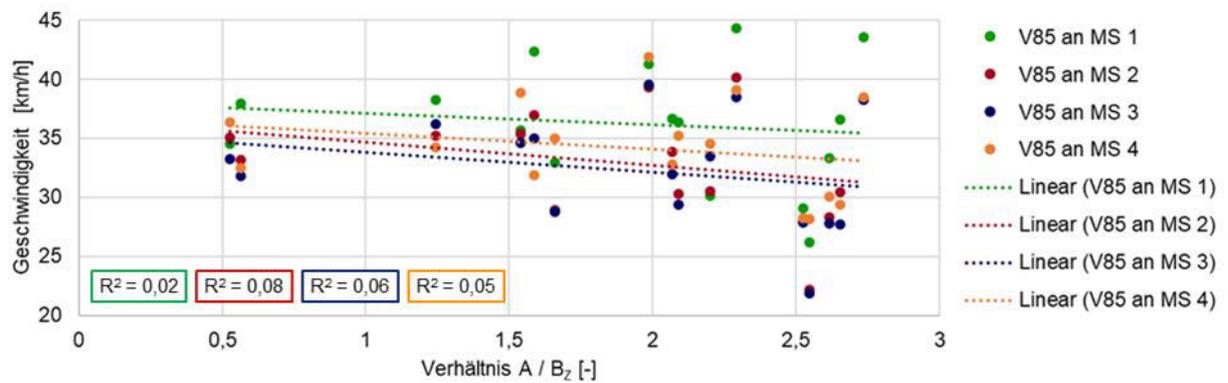


Bild 14.28: Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Verhältnis A / B_z

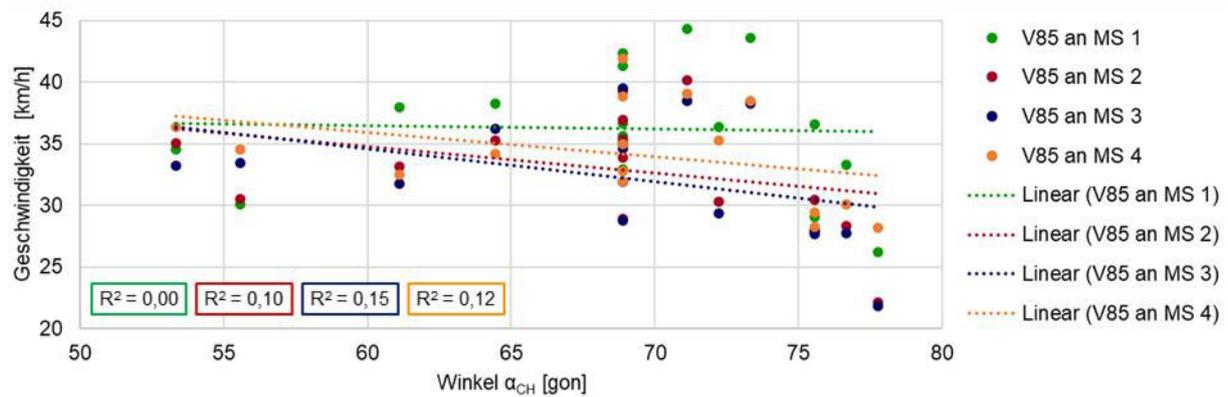


Bild 14.29: Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Winkel α_{CH}

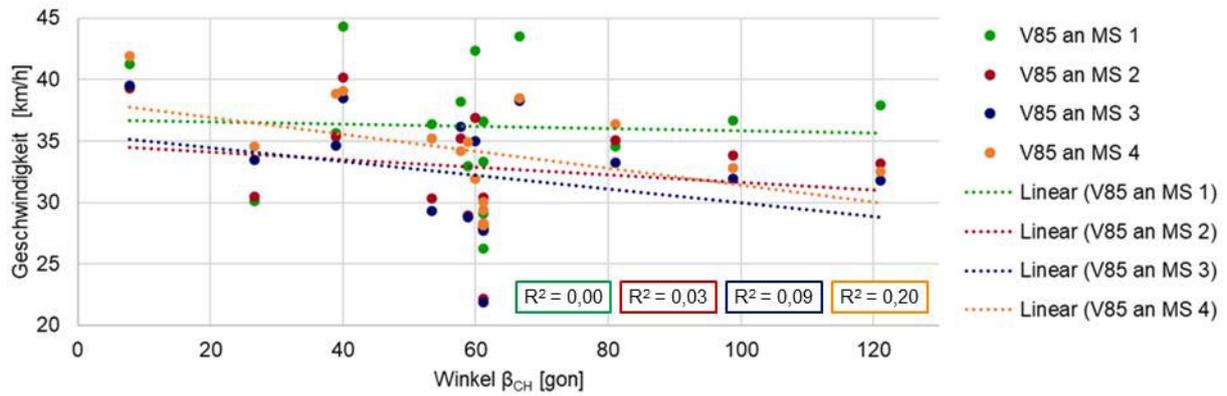


Bild 14.30: Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Winkel β_{CH}

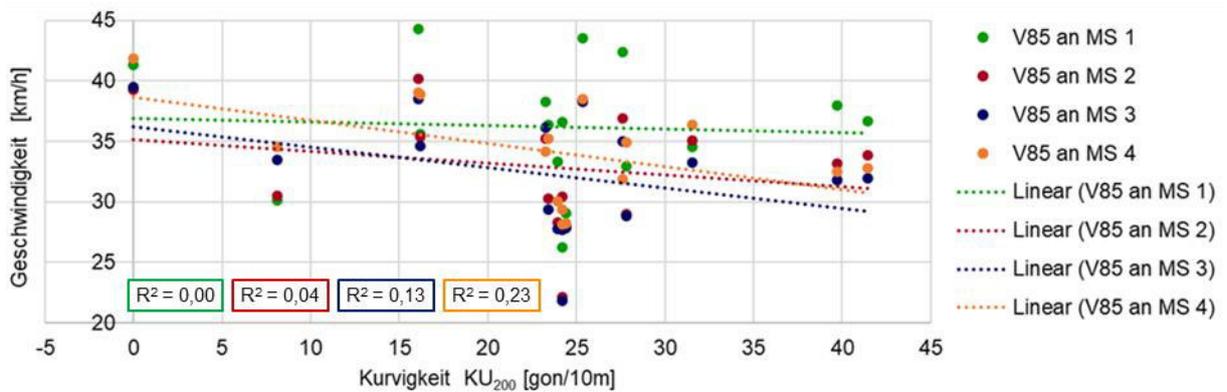


Bild 14.31: Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Kurvigkeit KU_{200}

14.10.4 Ausgewählte Verhältnisparameter – quadratische Regression

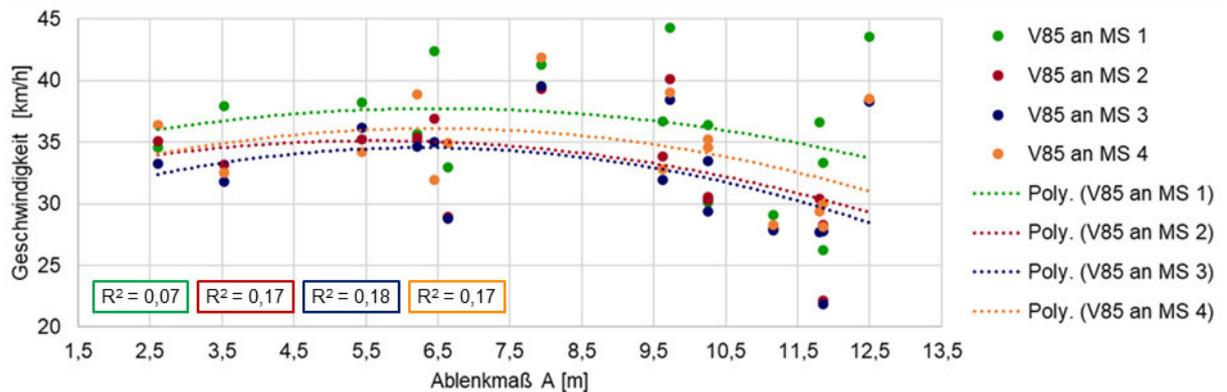


Bild 14.32: Quadratische Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Ablenkmaß A

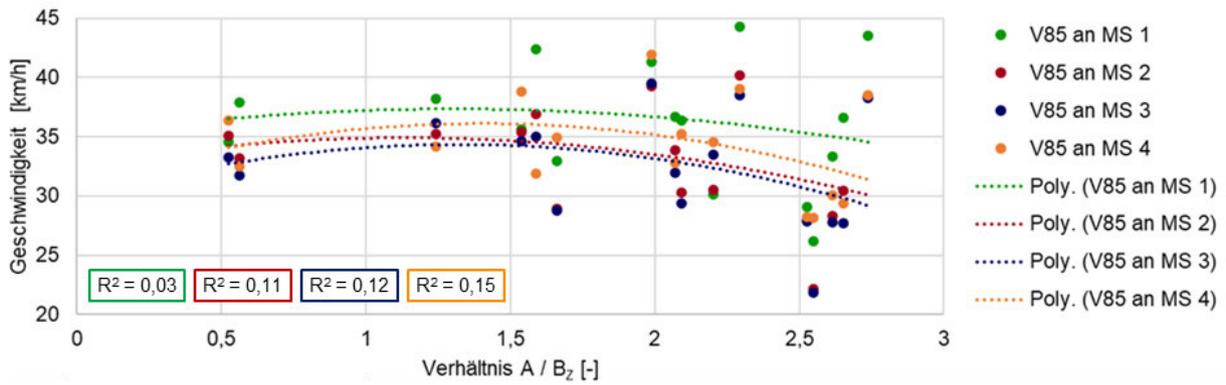


Bild 14.33: Quadratische Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Verhältnis A/B_z

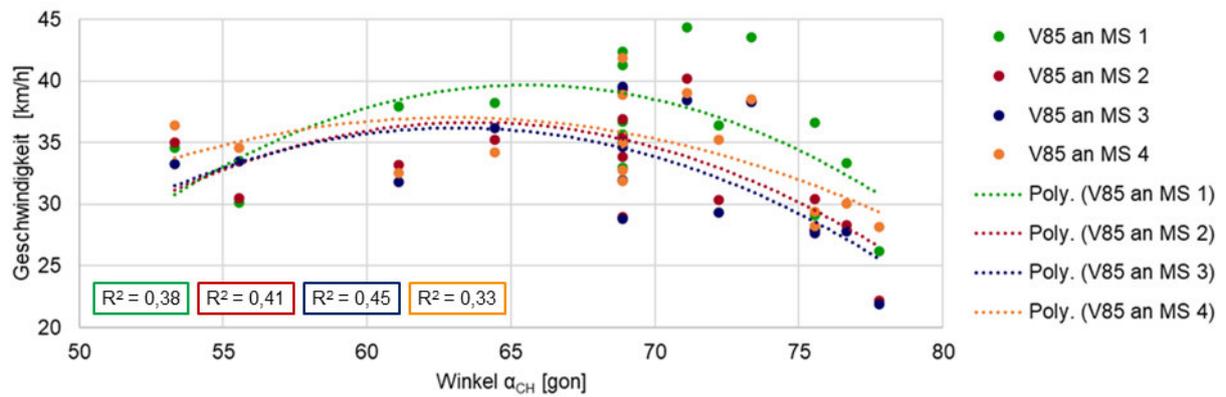


Bild 14.34: Quadratische Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Winkel α_{CH}

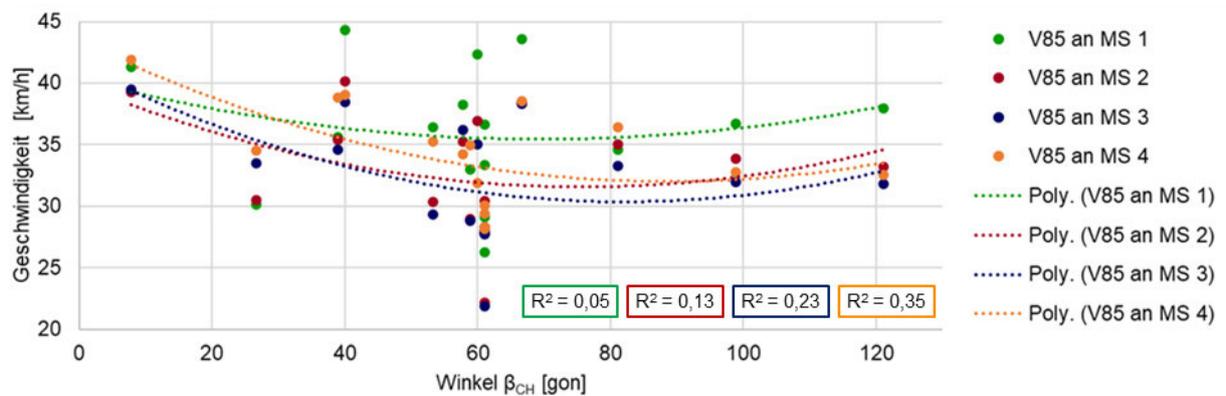


Bild 14.35: Quadratische Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Winkel β_{CH}

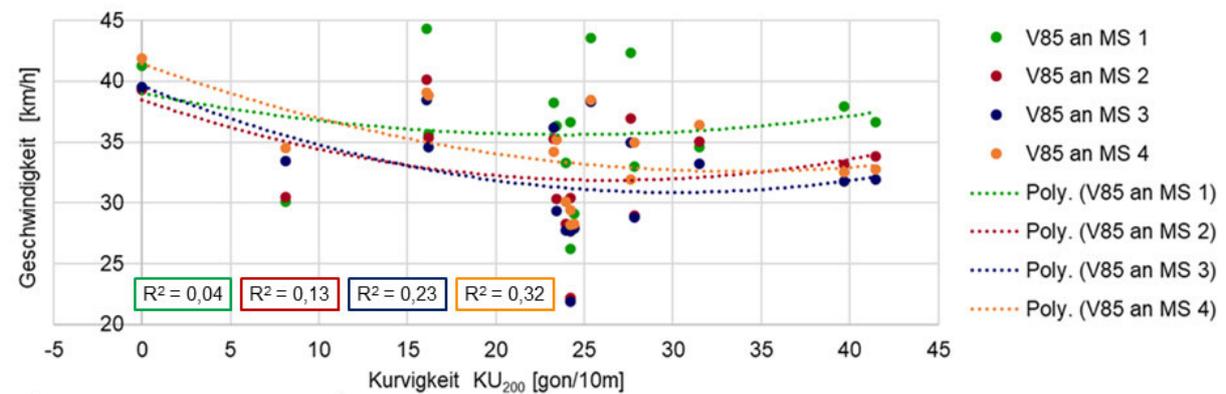


Bild 14.36: Quadratische Regression über Geschwindigkeit V_{85} und Kurvigkeit KU_{200}

14.11 Kurvigkeiten der Fahrlinien im Kollektiv 1.4

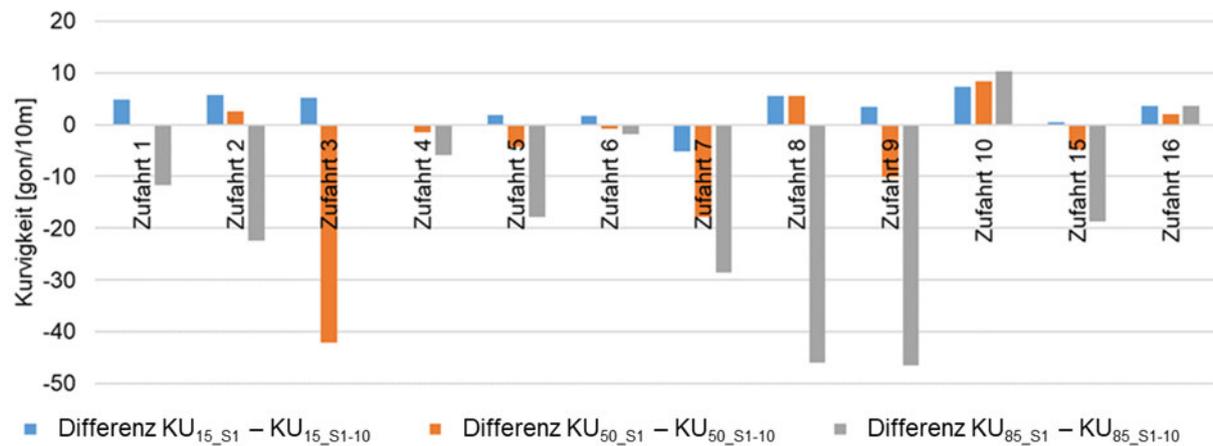


Bild 14.37: Differenzen der Quantile der Kurvigkeiten von Fahrliniensegment S1 zu Segment S1-10 in Kollektiv 1.4, ohne Kreisverkehr (1)

14.12 Diagramme Geschwindigkeitsverhalten und Lenkverhalten

14.12.1 Kurvigkeit – lineare Regression

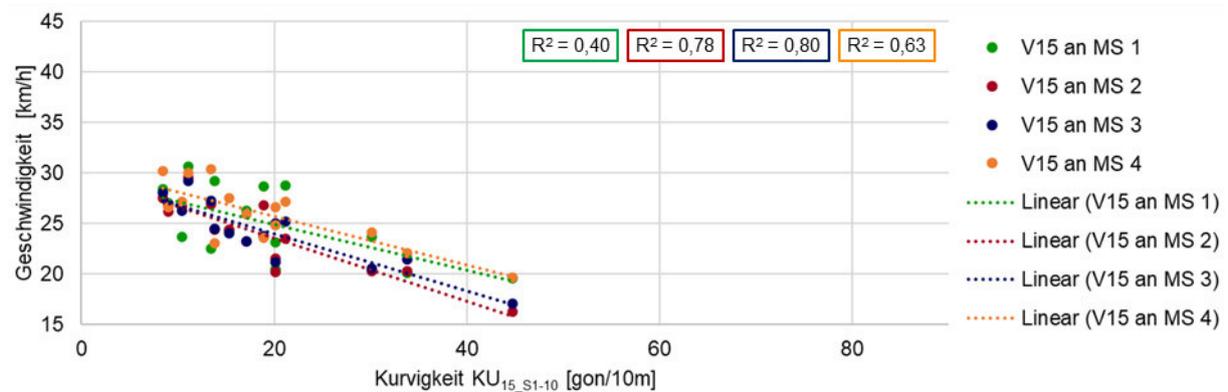


Bild 14.38: Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{15} und die Kurvigkeit KU_{15} im Segment S1-10

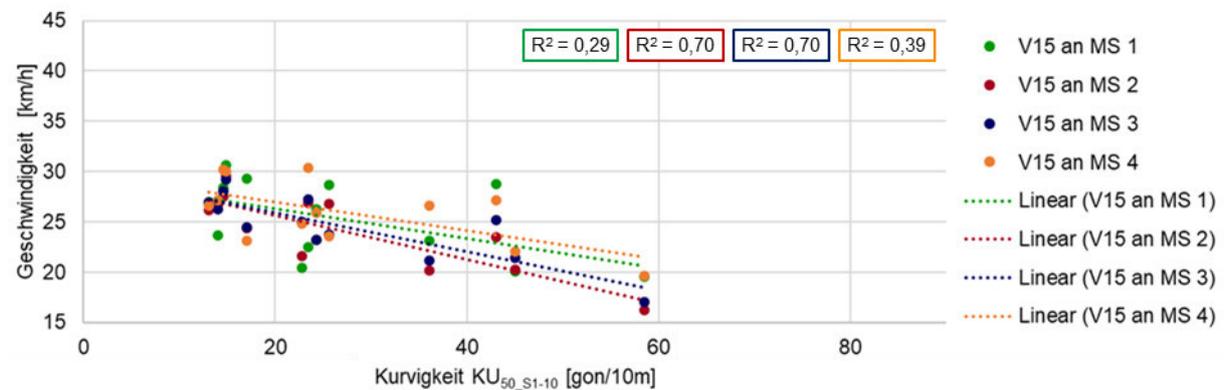


Bild 14.39: Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{15} und die Kurvigkeit KU_{50} im Segment S1-10

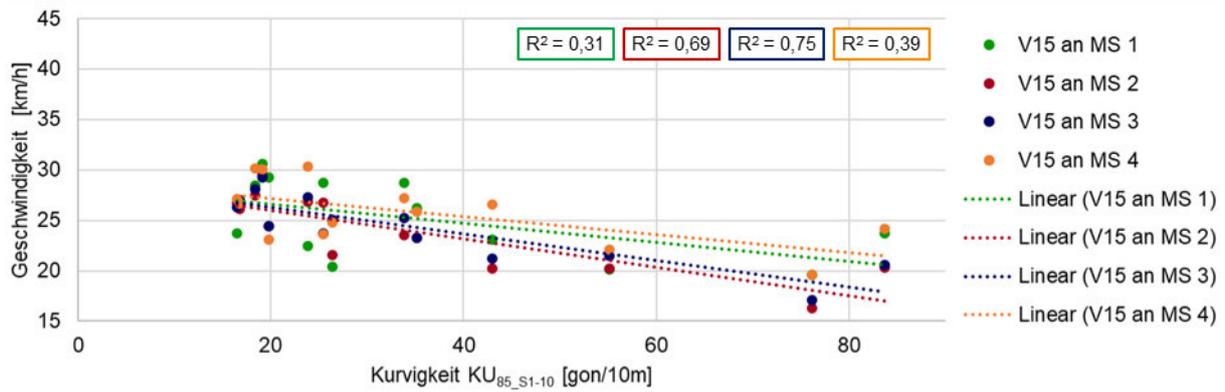


Bild 14.40: Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{15} und die Kurvigkeit KU_{85} im Segment S1-10

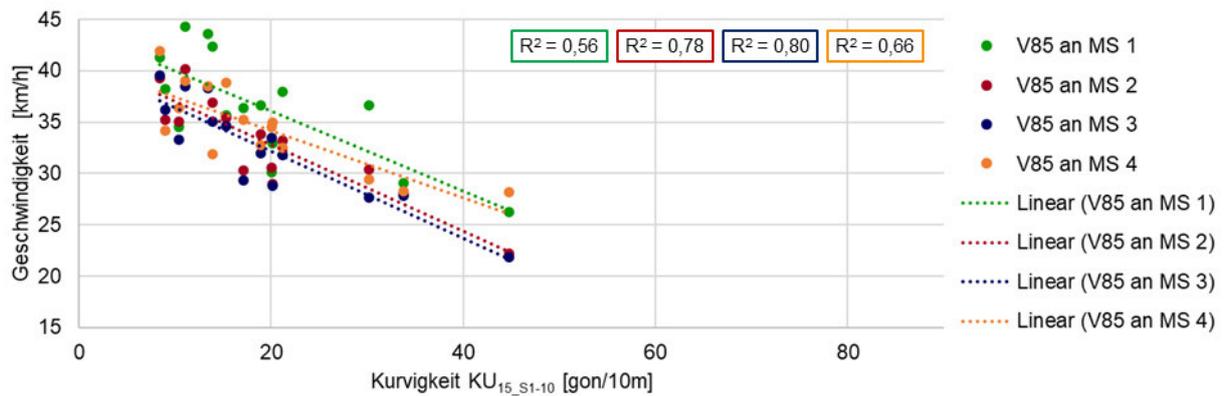


Bild 14.41: Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und die Kurvigkeit KU_{15} im Segment S1-10

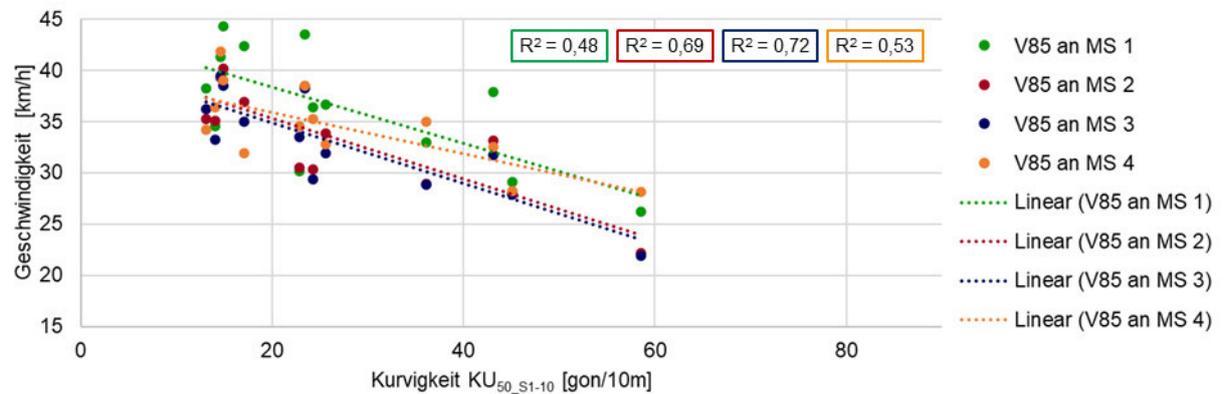


Bild 14.42: Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und die Kurvigkeit KU_{50} im Segment S1-10

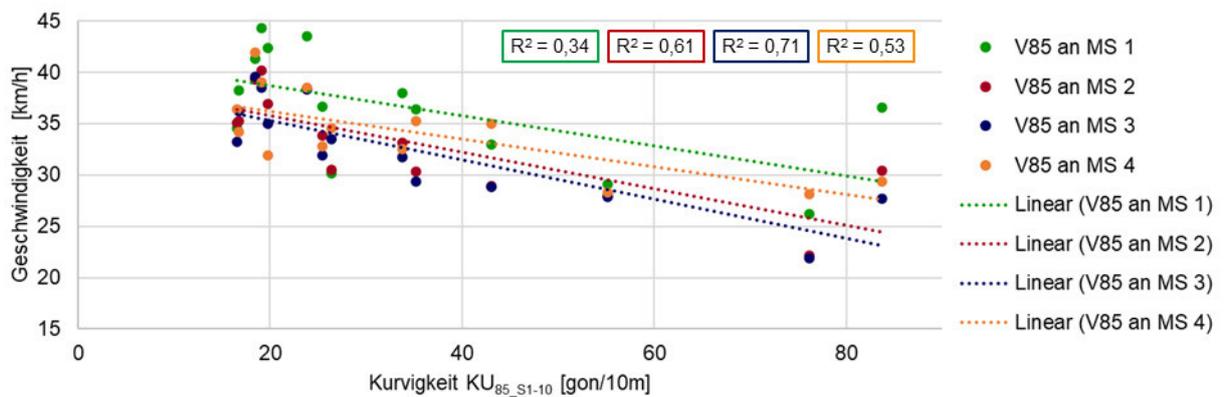


Bild 14.43: Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und die Kurvigkeit KU_{85} im Segment S1-10

14.12.2 Einfahrwinkel – lineare Regression

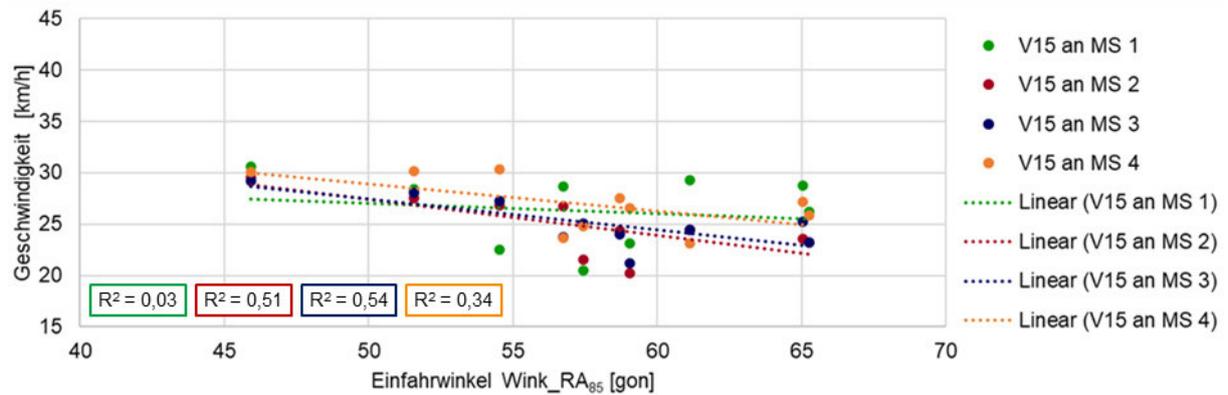


Bild 14.44: Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{15} und das 85 %-Quantil der Einfahrwinkel $Wink_RA_{85}$

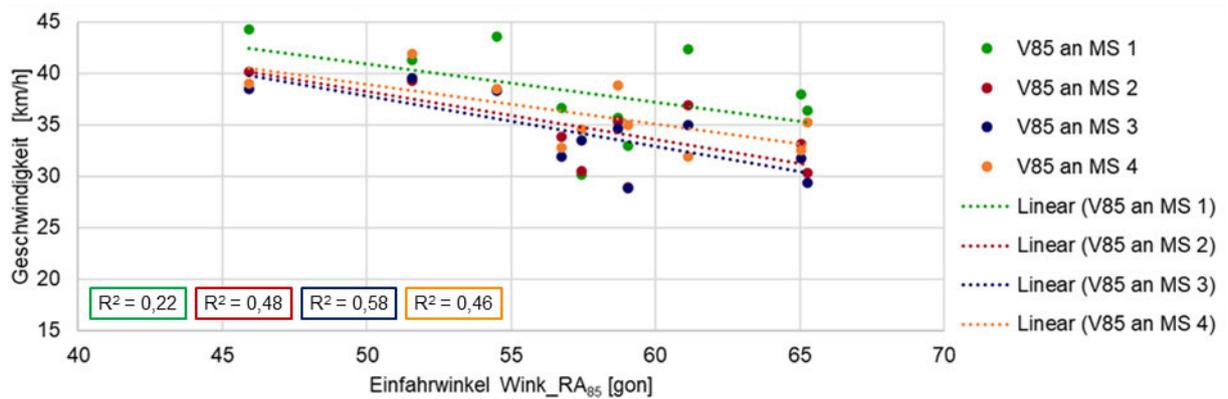


Bild 14.45: Lineare Regression über Geschwindigkeit V_{85} und das 85 %-Quantil der Einfahrwinkel $Wink_RA_{85}$

14.12.3 Geschwindigkeitsdifferenzen und Kurvigkeit

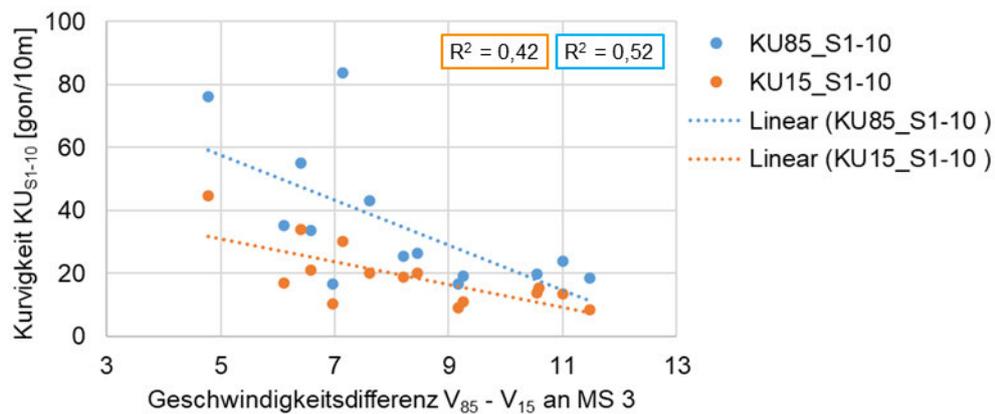


Bild 14.46: Vergleich von Geschwindigkeitsdifferenzen und Kurvigkeit im Fahrliniensegment S1-10

14.13 Berechnung der RIS-P-Werte

| Obergrenzen der Kategorien | | | | | | | | | |
|--|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Kategorie | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| UR | < 0,02 | < 0,04 | < 0,06 | < 0,08 | < 0,10 | < 0,12 | < 0,14 | < 0,16 | ≥ 0,16 |
| Winkel | < 1,24 | < 2,93 | < 4,63 | < 6,33 | < 8,03 | < 9,73 | < 11,4 | ≥ 11,4 | |
| Kontingenztafel (Häufigkeitstafel) | | | | | | | | | |
| Unfallraten-Kategorie | Winkel-Kategorie | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 1 | 10 | 9 | 26 | 18 | 29 | 15 | 15 | 17 | |
| 2 | 2 | 2 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| 3 | 1 | 3 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | |
| 4 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | |
| 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | |
| 6 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 8 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | |
| 9 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | |
| Gewichtete Wahrscheinlichkeiten auf Basis der Kontingenztafel | | | | | | | | | |
| Unfallraten-Kategorie | Winkel-Kategorie | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 1 | 0,0549 | 0,0495 | 0,1429 | 0,0989 | 0,1593 | 0,0824 | 0,0824 | 0,0934 | |
| 2 | 0,0110 | 0,0110 | 0,0165 | 0,0000 | 0,0055 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 3 | 0,0055 | 0,0165 | 0,0110 | 0,0110 | 0,0165 | 0,0055 | 0,0055 | 0,0110 | |
| 4 | 0,0110 | 0,0055 | 0,0000 | 0,0055 | 0,0055 | 0,0055 | 0,0055 | 0,0000 | |
| 5 | 0,0055 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0110 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 6 | 0,0055 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0055 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 7 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0055 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 8 | 0,0055 | 0,0055 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0055 | 0,0055 | 0,0000 | |
| 9 | 0,0055 | 0,0000 | 0,0055 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0055 | 0,0000 | 0,0000 | |
| Ergebnisse | | | | | | | | | |
| Wahrscheinlichkeiten mit Schadenshöhen-Faktorisierung = Risiko | 0,0423 | 0,0236 | 0,0198 | 0,0225 | 0,0137 | 0,0341 | 0,0148 | 0,0055 | |
| Anzahl Arme dieser Winkelkategorie | 19 | 16 | 32 | 23 | 34 | 21 | 18 | 19 | |
| Risiko pro Arm dieser Winkelkategorie = RIS-P (vgl. Bild 7.1) | 0,0022 | 0,0015 | 0,0006 | 0,0010 | 0,0004 | 0,0016 | 0,0008 | 0,0003 | |

Tabelle 14.11: Risikokennzahlen RIS-P für das Kategorienpaar 5j UR UTyp 1 / Winkel TE

| Obergrenzen der Kategorien | | | | | | | | | |
|--|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Kategorie | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| UR | < 0,02 | < 0,04 | < 0,06 | < 0,08 | < 0,10 | < 0,12 | < 0,14 | < 0,16 | ≥ 0,16 |
| Winkel | < 1,24 | < 2,93 | < 4,63 | < 6,33 | < 8,03 | < 9,73 | < 11,4 | ≥ 11,4 | |
| Kontingenztafel (Häufigkeitstafel) | | | | | | | | | |
| Unfallraten-Kategorie | Winkel-Kategorie | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 1 | 13 | 7 | 17 | 16 | 16 | 15 | 9 | 7 | |
| 2 | 2 | 3 | 4 | 1 | 1 | 2 | 0 | 3 | |
| 3 | 1 | 1 | 4 | 2 | 10 | 1 | 5 | 1 | |
| 4 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 0 | |
| 5 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 3 | |
| 6 | 0 | 0 | 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | |
| 7 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | |
| 8 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | |
| 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | |
| Gewichtete Wahrscheinlichkeiten auf Basis der Kontingenztafel | | | | | | | | | |
| Unfallraten-Kategorie | Winkel-Kategorie | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 1 | 0,0714 | 0,0385 | 0,0934 | 0,0879 | 0,0879 | 0,0824 | 0,0495 | 0,0385 | |
| 2 | 0,0110 | 0,0165 | 0,0220 | 0,0055 | 0,0055 | 0,0110 | 0,0000 | 0,0165 | |
| 3 | 0,0055 | 0,0055 | 0,0220 | 0,0110 | 0,0549 | 0,0055 | 0,0275 | 0,0055 | |
| 4 | 0,0110 | 0,0110 | 0,0055 | 0,0110 | 0,0165 | 0,0055 | 0,0110 | 0,0000 | |
| 5 | 0,0000 | 0,0055 | 0,0055 | 0,0055 | 0,0000 | 0,0055 | 0,0000 | 0,0165 | |
| 6 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0220 | 0,0055 | 0,0055 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0165 | |
| 7 | 0,0000 | 0,0055 | 0,0055 | 0,0000 | 0,0055 | 0,0055 | 0,0000 | 0,0055 | |
| 8 | 0,0000 | 0,0055 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0055 | 0,0055 | |
| 9 | 0,0055 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0110 | 0,0000 | 0,0055 | 0,0000 | |
| Ergebnisse | | | | | | | | | |
| Wahrscheinlichkeiten mit Schadenshöhen-Faktorisierung = Risiko | 0,0231 | 0,0357 | 0,0577 | 0,0258 | 0,0725 | 0,0220 | 0,0390 | 0,0560 | |
| Anzahl Arme dieser Winkelkategorie | 19 | 16 | 32 | 23 | 34 | 21 | 18 | 19 | |
| Risiko pro Arm dieser Winkelkategorie = RIS-P (vgl. Bild 7.2) | 0,0012 | 0,0022 | 0,0018 | 0,0011 | 0,0021 | 0,0010 | 0,0022 | 0,0029 | |

Tabelle 14.12: Risikokennzahlen RIS-P für das Kategorienpaar 5j UR UTyp 3 / Winkel TE

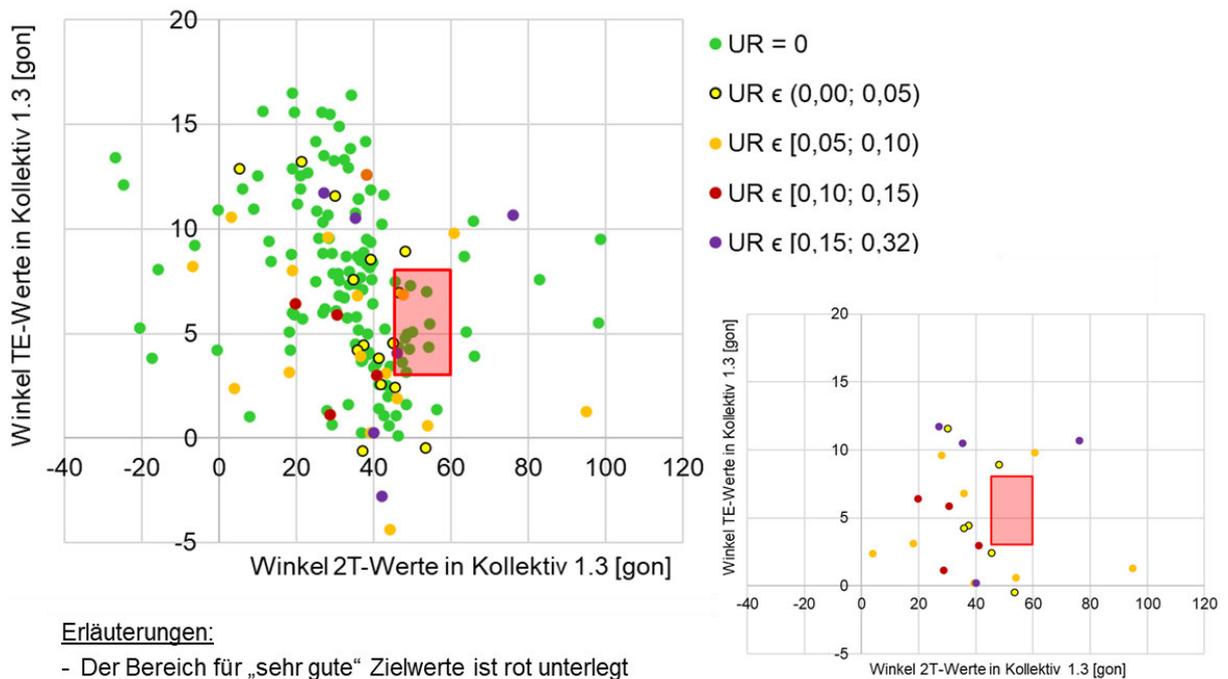
| Obergrenzen der Kategorien | | | | | | | | | |
|--|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Kategorie | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| UR | < 0,02 | < 0,04 | < 0,06 | < 0,08 | < 0,10 | < 0,12 | < 0,14 | < 0,16 | ≥ 0,16 |
| Winkel | < 11,8 | < 17,2 | < 22,7 | < 28,2 | < 33,6 | < 39,1 | < 44,6 | ≥ 44,6 | |
| Kontingenztafel (Häufigkeitstafel) | | | | | | | | | |
| Unfallraten-Kategorie | Winkel-Kategorie | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 1 | 8 | 4 | 6 | 14 | 23 | 18 | 11 | 12 | |
| 2 | 0 | 2 | 1 | 3 | 0 | 4 | 2 | 3 | |
| 3 | 3 | 1 | 2 | 5 | 5 | 2 | 5 | 1 | |
| 4 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 | 3 | 0 | |
| 5 | 2 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| 6 | 1 | 0 | 0 | 1 | 5 | 0 | 1 | 0 | |
| 7 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | |
| 8 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | |
| 9 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | |
| Gewichtete Wahrscheinlichkeiten auf Basis der Kontingenztafel | | | | | | | | | |
| Unfallraten-Kategorie | Winkel-Kategorie | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 1 | 0,0462 | 0,0231 | 0,0347 | 0,0809 | 0,1329 | 0,1040 | 0,0636 | 0,0694 | |
| 2 | 0,0000 | 0,0116 | 0,0058 | 0,0173 | 0,0000 | 0,0231 | 0,0116 | 0,0173 | |
| 3 | 0,0173 | 0,0058 | 0,0116 | 0,0289 | 0,0289 | 0,0116 | 0,0289 | 0,0058 | |
| 4 | 0,0116 | 0,0058 | 0,0058 | 0,0116 | 0,0058 | 0,0173 | 0,0173 | 0,0000 | |
| 5 | 0,0116 | 0,0000 | 0,0116 | 0,0058 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0058 | |
| 6 | 0,0058 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0058 | 0,0289 | 0,0000 | 0,0058 | 0,0000 | |
| 7 | 0,0058 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0058 | 0,0058 | 0,0058 | |
| 8 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0058 | 0,0000 | 0,0058 | 0,0058 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 9 | 0,0058 | 0,0058 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0116 | 0,0000 | 0,0000 | |
| Ergebnisse | | | | | | | | | |
| Wahrscheinlichkeiten mit Schadenshöhen-Faktorisierung = Risiko | 0,0509 | 0,0202 | 0,0306 | 0,0393 | 0,0590 | 0,0607 | 0,0439 | 0,0208 | |
| Anzahl Arme dieser Winkelkategorie | 18 | 9 | 13 | 26 | 35 | 31 | 23 | 18 | |
| Risiko pro Arm dieser Winkelkategorie = RIS-P (vgl. Bild 7.3) | 0,0028 | 0,0022 | 0,0024 | 0,0015 | 0,0017 | 0,0020 | 0,0019 | 0,0012 | |

Tabelle 14.13: Risikokennzahlen RIS-P für das Kategorienpaar 5j UR UTyp 3 / Winkel 2T

| Obergrenzen der Kategorien | | | | | | | | | |
|--|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Kategorie | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| UR | < 0,02 | < 0,04 | < 0,06 | < 0,08 | < 0,10 | < 0,12 | < 0,14 | < 0,16 | ≥ 0,16 |
| Winkel | < 17,1 | < 21,5 | < 26,0 | < 30,4 | < 34,8 | < 39,3 | < 43,7 | ≥ 43,7 | |
| Kontingenztafel (Häufigkeitstafel) | | | | | | | | | |
| Unfallraten-Kategorie | Winkel-Kategorie | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 1 | 5 | 5 | 9 | 11 | 15 | 9 | 9 | 11 | |
| 2 | 1 | 2 | 1 | 0 | 4 | 4 | 1 | 1 | |
| 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 6 | 3 | 4 | 0 | |
| 4 | 0 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 0 | 1 | |
| 5 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| 6 | 1 | 0 | 0 | 1 | 4 | 0 | 0 | 0 | |
| 7 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | |
| 8 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | |
| 9 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| Gewichtete Wahrscheinlichkeiten auf Basis der Kontingenztafel | | | | | | | | | |
| Unfallraten-Kategorie | Winkel-Kategorie | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 1 | 0,0357 | 0,0357 | 0,0643 | 0,0786 | 0,1071 | 0,0643 | 0,0643 | 0,0786 | |
| 2 | 0,0071 | 0,0143 | 0,0071 | 0,0000 | 0,0286 | 0,0286 | 0,0071 | 0,0071 | |
| 3 | 0,0143 | 0,0143 | 0,0143 | 0,0143 | 0,0429 | 0,0214 | 0,0286 | 0,0000 | |
| 4 | 0,0000 | 0,0071 | 0,0071 | 0,0143 | 0,0143 | 0,0214 | 0,0000 | 0,0071 | |
| 5 | 0,0071 | 0,0071 | 0,0071 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0071 | |
| 6 | 0,0071 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0071 | 0,0286 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 7 | 0,0143 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0071 | 0,0071 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 8 | 0,0000 | 0,0071 | 0,0000 | 0,0071 | 0,0000 | 0,0071 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 9 | 0,0143 | 0,0071 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0071 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| Ergebnisse | | | | | | | | | |
| Wahrscheinlichkeiten mit Schadenshöhen-Faktorisierung = Risiko | 0,0664 | 0,0457 | 0,0207 | 0,0357 | 0,0929 | 0,0543 | 0,0164 | 0,0136 | |
| Anzahl Arme dieser Winkelkategorie | 14 | 13 | 14 | 17 | 33 | 21 | 14 | 14 | |
| Risiko pro Arm dieser Winkelkategorie = RIS-P (vgl. Bild 7.4) | 0,0047 | 0,0035 | 0,0015 | 0,0021 | 0,0028 | 0,0026 | 0,0012 | 0,0010 | |

Tabelle 14.14: Risikokennzahlen RIS-P für das Kategorienpaar 5j UR UTyp 3,fZ / Winkel 2T

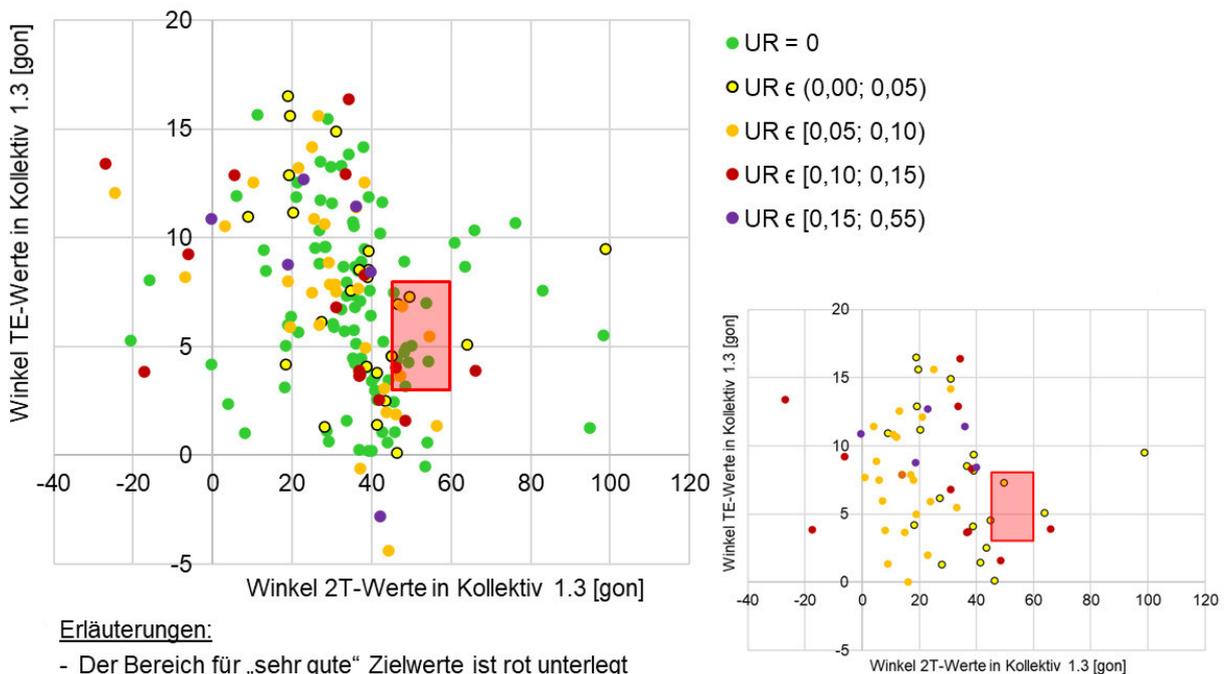
14.14 Überlagerung von Unfallkennwerten und Prüfparametern



Erläuterungen:

- Der Bereich für „sehr gute“ Zielwerte ist rot unterlegt
- Kleines Diagramm rechts:
Auswahl derjenigen UR-Werte an Zufahrten, an denen nur Unfalltyp 1 vorliegt – Grundlage zu Bild 7.8

Bild 14.47: Überlagerung der Prüfparameter mit Unfallraten ausschließlich von Unfalltyp 1 (Fahrnfälle)



Erläuterungen:

- Der Bereich für „sehr gute“ Zielwerte ist rot unterlegt
- Kleines Diagramm rechts:
Auswahl derjenigen UR-Werte an Zufahrten, an denen nur Unfalltyp 3 vorliegt – Grundlage zu Bild 7.8

Bild 14.48: Überlagerung der Prüfparameter mit Unfallraten ausschließlich von Unfalltyp 3 (EK-Unfälle)

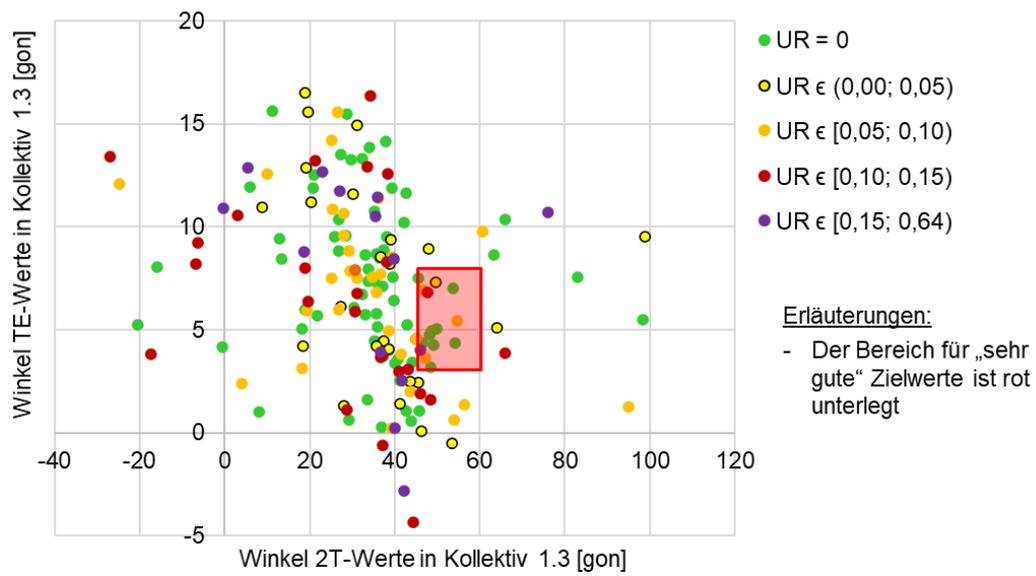


Bild 14.49: Überlagerung der Prüfparameter mit addierten Unfallraten der Unfalltypen 1 (Fahrerunfälle) und 3 (EK-Unfälle)

14.15 Werte für 2T und TE im Rahmen der Variation von R_i und B_i

| | Grundmaße für jede Kombination | | | | | |
|---------------------------|---|------|------|------|------|------|
| Größenstufe | | KV1 | KV2 | KV3 | KV4 | KV5 |
| Außendurchmesser D | [m] | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| Kreisfahrbahnbreite B_K | [m] | 8 | 7 | 6,5 | 6,5 | 6,5 |
| Kreisinselradius R_i | [m] | 7 | 10,5 | 13,5 | 16 | 18,5 |
| | Kombination 1-1 (R_z 14,0 m / B_z 4,0 m / R_A 16,0 m / B_A 4,75 m) | | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 9,5 | 28,7 | 40,7 | 50,7 | 58,2 |
| Winkel TE | [gon] | 11,9 | 6,0 | 2,4 | 0,4 | -1,5 |
| | Kombination 1-2 (R_z 14,0 m / B_z 4,5 m / R_A 16,0 m / B_A 5,0 m) | | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 7,5 | 25,9 | 39,7 | 48,9 | 55,2 |
| Winkel TE | [gon] | 13,1 | 7,3 | 3,7 | 1,7 | -0,1 |
| | Kombination 1-3 (R_z 14,0 m / B_z 5,0 m / R_A 16,0 m / B_A 5,5 m) | | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 4,1 | 24,1 | 37,9 | 46,5 | 54,4 |
| Winkel TE | [gon] | 14,3 | 8,7 | 4,8 | 3,0 | 1,3 |
| | Kombination 2-2 (R_z 15,0 m / B_z 4,5 m / R_A 17,0 m / B_A 5,0 m) | | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 7,2 | 25,6 | 39,1 | 48 | 55,6 |
| Winkel TE | [gon] | 13,7 | 8,5 | 4,9 | 3,1 | 1,4 |
| | Kombination 3-1 (R_z 16,0 m / B_z 4,0 m / R_A 18,0 m / B_A 4,75 m) | | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 8,9 | 27,5 | 40,6 | 48,7 | 56,6 |
| Winkel TE | [gon] | 13,4 | 7,9 | 4,3 | 2,6 | 0,9 |
| | Kombination 3-2 (R_z 16,0 m / B_z 4,5 m / R_A 18,0 m / B_A 5,0 m) | | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 7,1 | 25,8 | 39,2 | 47,4 | 53,8 |
| Winkel TE | [gon] | 14,4 | 8,9 | 5,5 | 3,7 | 2,2 |
| | Kombination 3-3 (R_z 16,0 m / B_z 5,0 m / R_A 18,0 m / B_A 5,5 m) | | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 4,1 | 23,3 | 36,8 | 45,8 | 53,2 |
| Winkel TE | [gon] | 15,4 | 10,0 | 6,7 | 4,7 | 3,2 |

Tabelle 14.15: Prüfwerte TE und 2T für die Kombinationen der Parameter R_z bzw. R_A sowie B_z bzw. B_A gemäß Tabelle 8.2

14.16 Werte für 2T und TE im Rahmen der Variation der Achsanordnungen

14.16.1 Variation der Winkel

| Grundmaße für jede Kombination | | | | | |
|--|-------|------|------|------|------|
| Außendurchmesser D | [m] | 35 | 40 | 45 | 50 |
| Kreisfahrbahnbreite B _k | [m] | 7 | 6,5 | 6,5 | 6,5 |
| Kreisinselradius R _i | [m] | 10,5 | 13,5 | 16 | 18,5 |
| Kombination 2-2 mit 200 gon (Ausgangssituation) | | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 25,6 | 39,1 | 48 | 55,6 |
| Winkel TE | [gon] | 8,5 | 4,9 | 3,1 | 1,4 |
| Kombination 2-2 mit 190 gon | | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 15,5 | 29,2 | 37,9 | 45,6 |
| Winkel TE | [gon] | 8,5 | 4,9 | 3,1 | 1,4 |
| Kombination 2-2 mit 195 gon | | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 20,5 | 34,1 | 42,9 | 50,7 |
| Winkel TE | [gon] | 8,5 | 4,9 | 3,1 | 1,4 |
| Kombination 2-2 mit 205 gon | | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 30,5 | 44,0 | 53,1 | 60,6 |
| Winkel TE | [gon] | 8,5 | 4,9 | 3,1 | 1,4 |
| Kombination 2-2 mit 210 gon | | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 35,5 | 49,1 | 58,1 | 65,6 |
| Winkel TE | [gon] | 8,5 | 4,9 | 3,1 | 1,4 |

Tabelle 14.16: Prüfwerte TE und 2T für Variation der Winkel in Geradeaus-Richtung

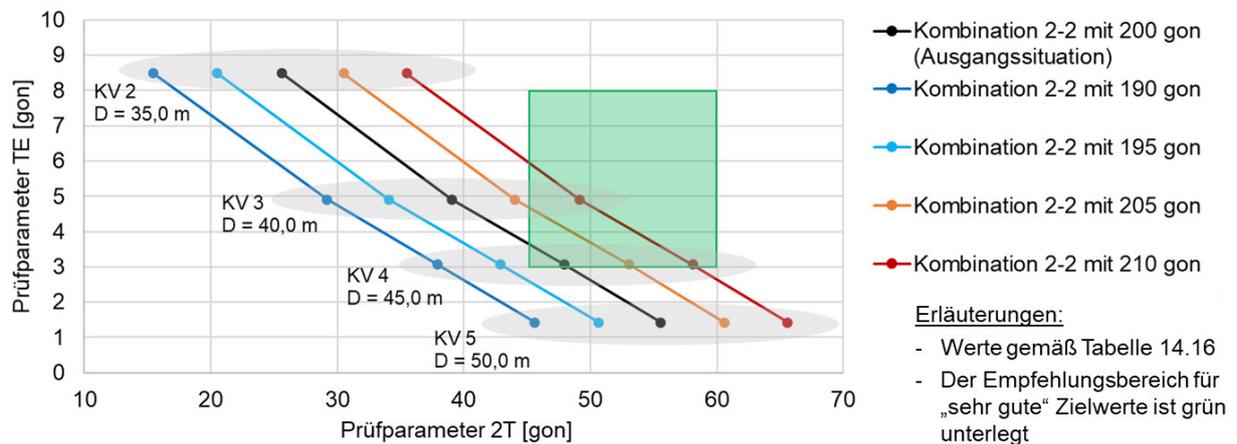


Bild 14.50: Überlagerte Werte für TE bzw. 2T für die Variation der Winkel in Geradeaus-Richtung

14.16.2 Punktsymmetrische Rechts- und Linksversätze

| Kombination, Beschreibung | (Kombination 2-2-0-0) (Ausgangssituation) | Kombination 2-2-1l-1l | Kombination 2-2-2l-2l |
|---------------------------|--|--|--|
| Versatzmaße | $V_{ZG} = 0,0 \text{ m}$ $V_{ZP} = 0,0 \text{ m}$ | $V_{ZG,l} = 1,0 \text{ m}$ $V_{ZP,l} = 1,0 \text{ m}$ | $V_{ZG,l} = 2,0 \text{ m}$ $V_{ZP,l} = 2,0 \text{ m}$ |
| Kombination, Beschreibung | | Kombination 2-2-1r-1r | Kombination 2-2-2r-2r |
| Versatzmaße | | $V_{ZG,r} = 1,0 \text{ m}$ $V_{ZP,r} = 1,0 \text{ m}$ | $V_{ZG,r} = 2,0 \text{ m}$ $V_{ZP,r} = 2,0 \text{ m}$ |

Tabelle 14.17: Übersicht und Eigenschaften der Variation "Punktsymmetrische Links- und Rechtsversätze"

| | Grundmaße für jede Kombination | | | | |
|------------------------------------|--|------|------|------|------|
| Außendurchmesser D | [m] | 35 | 40 | 45 | 50 |
| Kreisfahrbahnbreite B _K | [m] | 7 | 6,5 | 6,5 | 6,5 |
| Kreisinselradius R _I | [m] | 10,5 | 13,5 | 16 | 18,5 |
| | Kombination 2-2-0-0 (Ausgangssituation) | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 25,6 | 39,1 | 48 | 55,6 |
| Winkel TE | [gon] | 8,5 | 4,9 | 3,1 | 1,4 |
| | Kombination 2-2-1l-1l | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 25,5 | 39,1 | 47,9 | 55,7 |
| Winkel TE | [gon] | 8,3 | 4,8 | 3,0 | 1,4 |
| | Kombination 2-2-2l-2l | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 25,2 | 38,8 | 48,0 | 55,6 |
| Winkel TE | [gon] | 8,1 | 4,8 | 2,9 | 1,42 |
| | Kombination 2-2-1r-1r | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 25,5 | 39,0 | 47,8 | 55,6 |
| Winkel TE | [gon] | 8,9 | 5,3 | 3,3 | 1,5 |
| | Kombination 2-2-2r-2r | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 25,1 | 38,7 | 47,6 | 55,5 |
| Winkel TE | [gon] | 9,4 | 5,6 | 3,6 | 1,7 |

Tabelle 14.18: Prüfwerte TE und 2T für punktsymmetrische Rechts- und Linksversätze

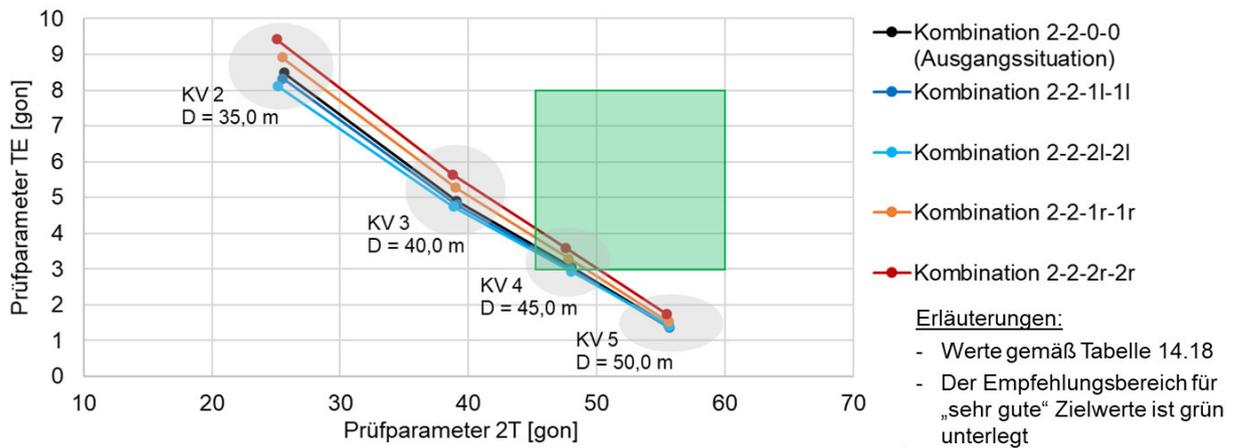


Bild 14.51: Überlagerte Werte für TE bzw. 2T für punktsymmetrische Rechts- und Linksversätze

14.16.3 Einseitige Achsversätze

| Kombination, Beschreibung | (Kombination 2-2-0-0) (Ausgangssituation) | Kombination 2-2-1l-1r | Kombination 2-2-2l-2r |
|---------------------------|--|--|--|
| Versatzmaße | $V_{ZG} = 0,0$ m $V_{ZP} = 0,0$ m | $V_{ZG,l} = 1,0$ m $V_{ZP,r} = 1,0$ m | $V_{ZG,l} = 2,0$ m $V_{ZP,r} = 2,0$ m |
| Kombination, Beschreibung | | Kombination 2-2-1r-1l | Kombination 2-2-2r-2l |
| Versatzmaße | | $V_{ZG,r} = 1,0$ m $V_{ZP,l} = 1,0$ m | $V_{ZG,r} = 2,0$ m $V_{ZP,l} = 2,0$ m |

Tabelle 14.19: Übersicht und Eigenschaften der Variation "Einseitige Achsversätze"

| Grundmaße für jede Kombination | | | | | |
|---|-------|------|------|------|------|
| Außendurchmesser D | [m] | 35 | 40 | 45 | 50 |
| Kreisfahrbahnbreite B_k | [m] | 7 | 6,5 | 6,5 | 6,5 |
| Kreisinselradius R_i | [m] | 10,5 | 13,5 | 16 | 18,5 |
| Kombination 2-2-0-0 (Ausgangssituation) | | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 25,6 | 39,1 | 48 | 55,6 |
| Winkel TE | [gon] | 8,5 | 4,9 | 3,1 | 1,4 |
| Kombination 2-2-2l-2r | | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 15,0 | 29,8 | 39,7 | 48,2 |
| Winkel TE | [gon] | 9,5 | 5,7 | 3,5 | 1,6 |
| Kombination 2-2-1l-1r | | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 20,4 | 34,7 | 44,0 | 52,1 |
| Winkel TE | [gon] | 9,0 | 5,2 | 3,3 | 1,6 |
| Kombination 2-2-1r-1l | | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 30,5 | 43,5 | 51,9 | 59,3 |
| Winkel TE | [gon] | 8,3 | 4,9 | 2,9 | 1,3 |
| Kombination 2-2-2r-2l | | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 35,2 | 47,7 | 55,9 | 62,9 |
| Winkel TE | [gon] | 8,1 | 4,7 | 3,0 | 1,5 |

Tabelle 14.20: Prüfwerte TE und 2T für einseitige Achsversätze

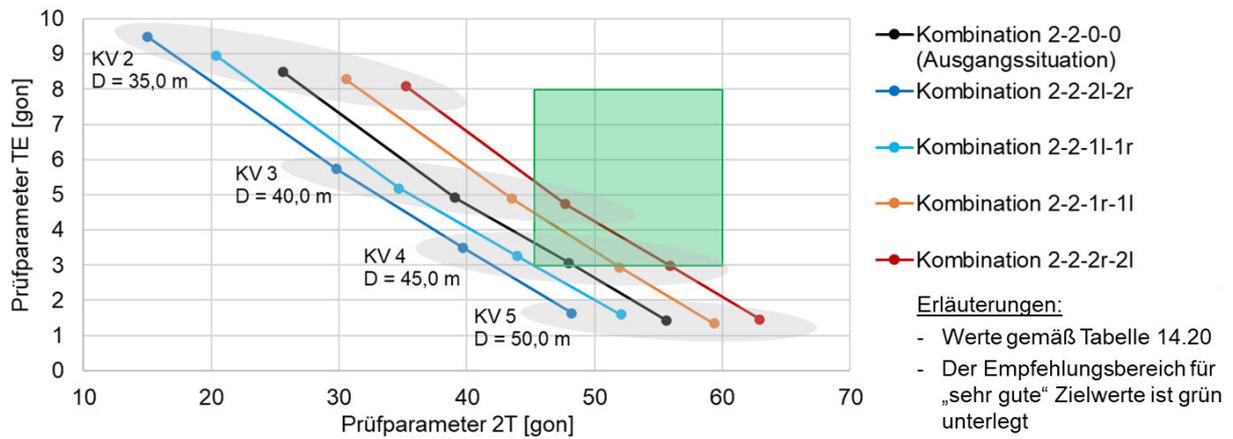
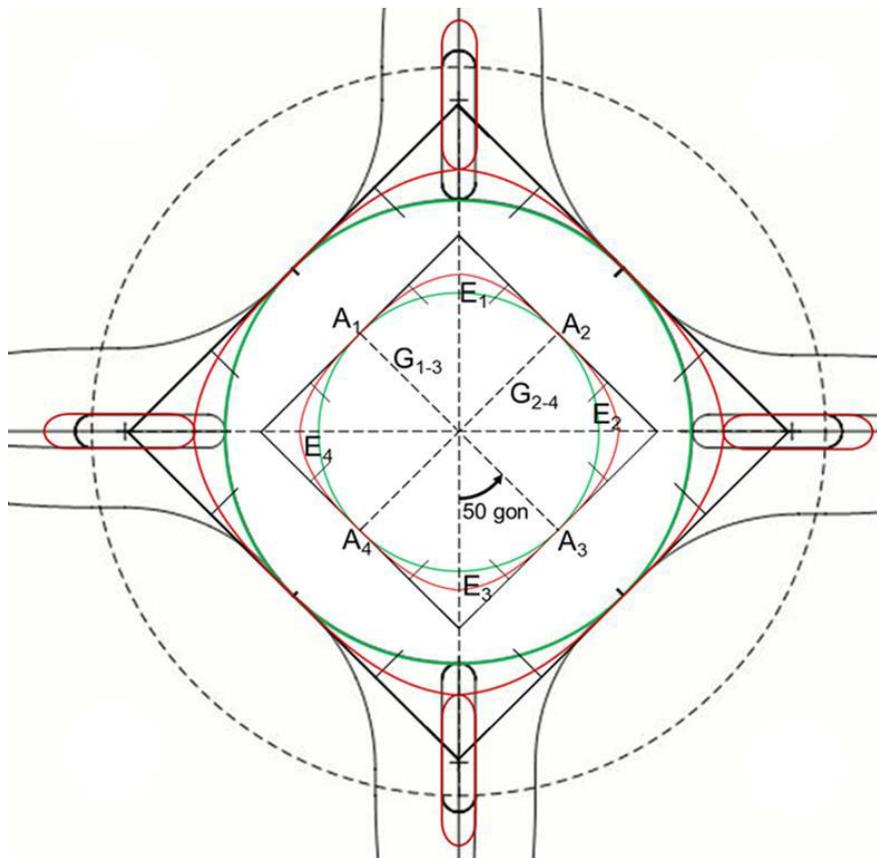


Bild 14.52: Überlagerte Werte für TE bzw. 2T für einseitige Achsversätze

14.17 „Klothoiden-Kreisverkehre“



- Erläuterungen:
- Verdrehung der Diagonalen um 50 gon zur Zufahrtsachse.
 - Die relevanten Konstruktionspunkte sind am Beispiel der Kreisinsel aufgezeigt.
 - Grün: „echte“ Kreisformen.
 - Rot: Klothoidenformen und verschobene Fahrbahnteiler.
 - Keine zusätzliche Ausrundungen R_{KI} erforderlich (vgl. Bild 8.5).
 - Schwarz gestrichelt: „10 m-Ring“ zur Ermittlung von TE (verbleibt in ursprünglicher Lage und Form).

Bild 14.53: Prinzipskizze der Grundform eines "Klothoiden-Kreisverkehrs" mit 50 gon Verdrehung zur Zufahrtsachse (eigene Darstellung auf Grundlage von Wikipedia, 2012)

| Erreichbare Prüfparameter-Werte für vierarmige „Klothoiden-Kreisverkehre“ bei Einsatz der Kombination 2-2 der Parameter „Ausradius der Zufahrt (bzw. Ausfahrt)“ R_z bzw. R_A sowie „Breite der Zufahrt (bzw. Ausfahrt)“ B_z bzw. B_A , jeweils in Abhängigkeit von Achsversatz und Außendurchmesser D | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|
| Achsversatz 50 gon | | | | | | |
| D [m] | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
| Kombination | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 |
| TE [gon] | 5,6 | 5,6 | 3,3 | 2,8 | 1,4 | 0,8 |
| 2T [gon] | 32,2 | 35,6 | 37,8 | 40,0 | 43,9 | 45,7 |
| Achsversatz 33,33 bzw. 66,67 gon (vgl. Bild 8.5) | | | | | | |
| D [m] | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
| Kombination | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 | 2-2 |
| TE [gon] | 7,2 | 6,7 | 5,6 | 3,9 | 3,3 | 2,8 |
| 2T [gon] | 31,7 | 35,6 | 37,8 | 40,6 | 42,8 | 45,0 |

Tabelle 14.21: Erreichbare Prüfparameterwerte bei „Klothoiden-Kreisverkehren“ mit variierenden Achsversätzen

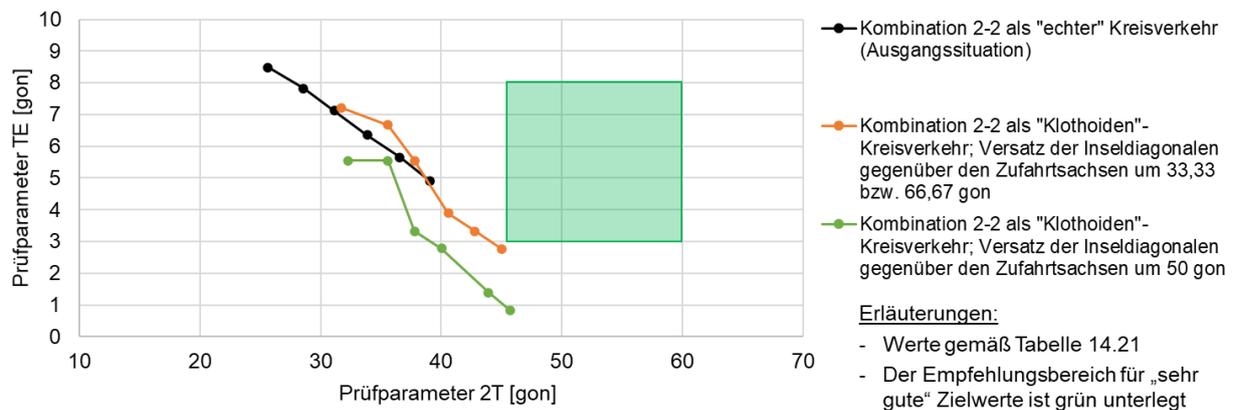


Bild 14.54: Überlagerte Werte für TE bzw. 2T für beispielhafte „Klothoiden-Kreisverkehre“

14.18 Variationen dreiarmer Kreisverkehre

| | Grundmaße für jede Kombination | | | | |
|------------------------------------|---|------|------|------|------|
| Außendurchmesser D | [m] | 35 | 40 | 45 | 50 |
| Kreisfahrbahnbreite B _K | [m] | 7 | 6,5 | 6,5 | 6,5 |
| Kreisinselradius R _i | [m] | 10,5 | 13,5 | 16 | 18,5 |
| | Kombination 2-2-0-0 (Ausgangssituation) | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 25,6 | 39,1 | 48 | 55,6 |
| Winkel TE | [gon] | 8,5 | 4,9 | 3,1 | 1,4 |
| | Kombination 2-2-1I-1r (Versatzmaß 1,0 m) | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 20,4 | 34,7 | 44 | 52 |
| Winkel TE | [gon] | 9 | 5,2 | 3,3 | 1,6 |
| | Kombination 2-2-1r-1I (Versatzmaß 1,0 m) | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 30,5 | 43,5 | 51,9 | 59,3 |
| Winkel TE | [gon] | 8,3 | 4,9 | 2,9 | 1,3 |
| | Kombination 2-2-2I-2r (Versatzmaß 2,0 m) | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 15 | 29,8 | 39,7 | 48,2 |
| Winkel TE | [gon] | 9,5 | 5,7 | 3,5 | 1,6 |
| | Kombination 2-2-2r-2I (Versatzmaß 2,0 m) | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 35,3 | 47,7 | 55,9 | 62,9 |
| Winkel TE | [gon] | 8,1 | 4,7 | 3 | 1,5 |
| | Kombination 2-2-3I-3r (Versatzmaß 3,0 m) | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 9,5 | 25,1 | 35,6 | 44,3 |
| Winkel TE | [gon] | 10,1 | 6,1 | 3,9 | 2 |
| | Kombination 2-2-3r-3I (Versatzmaß 3,0 m) | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 40 | 52,1 | 59,7 | 66,4 |
| Winkel TE | [gon] | 8,1 | 4,8 | 3,1 | 1,5 |
| | Kombination 2-2-4I-4r (Versatzmaß 4,0 m) | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 3,7 | 20,1 | 31,2 | 40,2 |
| Winkel TE | [gon] | 10,8 | 6,8 | 4,3 | 2,2 |
| | Kombination 2-2-4r-4I (Versatzmaß 4,0 m) | | | | |
| Winkel 2T | [gon] | 44,5 | 56,2 | 63,4 | 70,1 |
| Winkel TE | [gon] | 8 | 4,8 | 3,2 | 1,5 |

Tabelle 14.22: Prüfwerte TE und 2T für einseitige Achsversätze - Versatzmaße bis 4,0 m

14.19 Vergleich Unfalldatenkollektive mit aktuellen Untersuchungen

| | | SCHMOTZ et al., Kreisverkehre HE, SN, ST *) | SCHMOTZ et al., Kreisverkehre „Kollektiv“ *) – nur U(P)! | Diese Arbeit, Kollektiv 1.2 (n = 626 U) | Diese Arbeit, Kollektiv 1.3 (n = 270 U) |
|---|--------------|---|---|---|---|
| Fahrunfälle (Unfalltyp 1) | Anteil U(SP) | 8 % | 31 % | 8,2 % | 5,1 % |
| | Anteil U(LV) | 17 % | 69 % | 11,9 % | 11,4 % |
| | Anteil U(SS) | 21 % | - | 42,1 % | 48,1 % |
| | Anteil U(LS) | 54 % | - | 37,7 % | 35,4 % |
| EK-Unfälle (Unfalltyp 3) | Anteil U(SP) | 3 % | 15 % | 2,2 % | 1,9 % |
| | Anteil U(LV) | 20 % | 85 % | 20,9 % | 22,9 % |
| | Anteil U(SS) | 11 % | - | 14,9 % | 16,6 % |
| | Anteil U(LS) | 66 % | - | 62,0 % | 58,6 % |
| Unfälle im Längsverkehr (Unfalltyp 6) | Anteil U(SP) | 2 % | 12 % | 2,9 % | 5,9 % |
| | Anteil U(LV) | 23 % | 88 % | 74,3 % | 76,5 % |
| | Anteil U(SS) | 3 % | - | 2,9 % | 0,0 % |
| | Anteil U(LS) | 73 % | - | 20,0 % | 17,6 % |

*) Anteil aus Balkendiagramm qualitativ abgelesen

Tabelle 14.23: Vergleich der Unfallschwerstruktur

| | SCHMOTZ et al., Kreisverkehre HE, SN, ST | SCHMOTZ et al., Kreisverkehre „Kol- lektiv“ – nur U(P)! | Diese Arbeit, Kollektiv 1.2 | Diese Arbeit, Kollektiv 1.3 |
|--|--|---|--------------------------------|--------------------------------|
| Erhebungszeit- raum Unfallda- ten | 2016 / 2017 | Unterschiedlich; drei- bis Fünfjah- reszeiträume | 2012 bis 2016 | 2012 bis 2016 |
| Anzahl Kreisverkehre | 289 | 109 | 137 | 50 |
| UR [U/10 ⁶ Kfz] | - | 0,7 | - | 0,22 |
| UKR [EUR/1.000 Kfz] | - | 21,9 | - | 4,38 |
| Unfallanzahlen (in Klammern Unfalldichte UD: Durchschnittliche Unfälle pro Jahr und Kreisverkehr) | | | | |
| Fahrunfälle (Unfalltyp 1) | 455 (0,79) | 122 (0,23) | 159 (0,23) | 79 (0,32) |
| EK-Unfälle (Unfalltyp 3) | 312 (0,54) | 80 (0,15) | 397 (0,58) | 157 (0,63) |
| Unfälle im Längsverkehr (Unfalltyp 6) | 277 (0,48) | 52 (0,10) | 70 (0,10) | 34 (0,14) |
| Andere / sons- tige Unfälle | 134 (0,23) | 29 (0,05) | - | - |
| Anzahl Unfälle insgesamt | 1.178 | 279 | 626 | 270 |

Tabelle 14.24: Vergleich der Unfallanzahlen, UD, UR und UKR in den Kollektiven

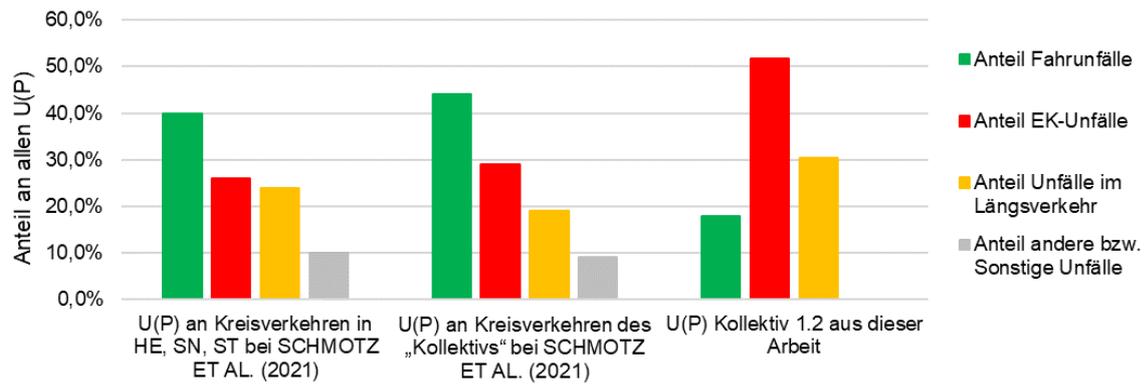


Bild 14.55: Anteil der Unfalltypen an allen U(P) in den Kollektiven