

DISS. ETH Nr. 22411

Spurverhalten von Motorfahrzeugen in Kurven

Zusammenhänge zwischen Spurtypen, Unfallgeschehen und Kurvengeometrie

Abhandlung zur Erlangung des Titels
DOKTORIN DER WISSENSCHAFTEN
(Dr. sc. ETH Zürich)

vorgelegt von
FRANZISKA BARBARA BAUMGARTNER
Dipl. Bauing. ETH, Zürich
geboren am 21.02.1980
von Kirchlindach BE

angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. Ulrich Weidmann, Referent
Prof. André-Gilles Dumont, Korreferent
Prof. Peter Spacek, Korreferent

2014

Dank

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich.

Mein erster Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Weidmann, Leiter Lehrstuhl für Verkehrssysteme am IVT der ETH Zürich. Es war nicht selbstverständlich, dass er sich nach der Emeritierung von Prof. Peter Spacek bereit erklärte, die Leitung meiner Dissertation zu übernehmen. Trotz des strassenverkehrslastigen Themas durfte ich auf sein grosses Engagement und Interesse an meiner Arbeit zählen. Die vielen Diskussionen haben mir wichtige Inputs gegeben, und er hat grossen Anteil am Gelingen dieser Arbeit.

Mein ganz besonderer Dank geht an Herrn Prof. Peter Spacek. Er hat mir ermöglicht, eine spannende Arbeit in einem hervorragenden Umfeld zu schreiben. Ich konnte jederzeit auf sein Engagement und seine grosse Unterstützung und Erfahrung zählen.

Herrn Prof. André-Gilles Dumont danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Bereitschaft, in letzter Minute das Korreferat zu übernehmen.

Frau Dr. Mahnam Saaednia danke ich für die grosse Unterstützung und die Programmierung des Rough Set Algorithmus. Ohne ihre fachlichen Inputs und ihre Hilfe wäre die Auswertung nicht möglich gewesen. Mahnam, thank you for beeing such a great „Bürogspänli“.

Herrn Martin Huber danke ich für die technische Hilfe beim Einsatz und der Wartung der Messpfosten.

Bei Herrn Prof. Hans Peter Lindenmann bedanke ich mich für die interessante und lehrreiche Zeit am IVT, mein fachlicher Horizont wurde durch ihn stark erweitert.

Weiter bedanke ich mich beim ehemaligen Leiter der Sektion Verkehrssicherheit des Kantons Aargau, Herrn Stevan Skeledzic, für die zur Verfügung gestellten Unfalldaten.

Allen meinen Kolleginnen und Kollegen am IVT danke ich für die unzähligen fachlichen Diskussionen, gemütlichen Kaffeepausen, spannenden Gespräche und fürs Zuhören, wenn die Motivation wieder einmal einen Tiefpunkt erreicht hatte. Merci Nicole Grau, Dr. Gerko Santel, Dr. Frank Schiffmann, Thomas Weber, Dr. Bernd Bopp, Dr. Olga Fink, Marion Doerfel, Ruth Bertschi und Ursi Hoerner, ich hatte eine tolle Zeit am IVT.

Meinem heutigen Arbeitgeber bei SNZ Ingenieure und Planer AG, Herrn Roger Laube danke ich für die Zeit, die ich im letzten Jahr immer mal wieder für meine Dissertation aufwenden konnte.

Meinen Eltern Lisbeth und Kurt Baumgartner danke ich, dass sie mir ermöglicht haben, das Studium meiner Wahl zu ergreifen. Danke für die Unterstützung und dafür, dass ihr jederzeit an mich geglaubt habt.

Der grösste Dank gilt meinem Partner Patrik Stadelmann für seine unendliche Geduld und Unterstützung in allen Lebenslagen, für das Verständnis in schwierigen Momenten und die Aufmunterung, wenn ich sie am nötigsten brauchte. Du hast einen wesentlichen Anteil zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

Und zuletzt danke ich Herrn Dr. Alex Buff für die Inspiration und Ermutigung, überhaupt eine Dissertation in Angriff zu nehmen. Alex, ohne dich wäre diese Dissertation nie entstanden.

Oberentfelden, im November 2014

Franziska Baumgartner

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war die Erarbeitung von Zusammenhängen zwischen Spurverhalten und Unfallgeschehen in Kurven. Im Vordergrund stand die Frage, ob alleine aufgrund des Spurverhaltens eine Aussage zum Unfallgeschehen gemacht werden kann.

Neben einer Literaturrecherche zum Thema Spurverhalten und Wahrnehmung, Kurvengeometrie und –ausstattung wurden mit einer Fehlerbaumanalyse der einzelnen Unfalltypen systematisch mögliche Ursache-Wirkungsmechanismen bestimmt. Es zeigte sich, dass eine eindeutige Zuordnung von Einflussfaktoren zu bestimmten Unfalltypen nicht möglich ist. Daher wurden in einem weiteren Schritt die Unfall- und Spurtypen bestimmten Kurvenabschnitten zugeordnet. Hier bestätigte sich die Vermutung, dass durchaus Unterschiede zwischen den einzelnen Kurvenabschnitten bestanden. Mit den so gewonnenen Erkenntnissen konnte ein theoretischer Index für die Gefährdung einer Kurve erstellt werden.

Mit empirischen Unfall- und Spurdaten wurden die in der Fehlerbaumanalyse gefundenen Einflussfaktoren auf ihre Signifikanz untersucht. Es hat sich gezeigt, dass eine vorhandene Sicherheitslinie, eine schmale Fahrbahn und eine Kurve nach einem längeren gestreckten Strassenabschnitt sowohl bei den Unfalltypen als auch bei den ungünstigen Spurtypen „Ausholen“, „Schneiden“, „Korrigieren“ und „Hinaustragen“ einen negativen Einfluss haben können.

Wie bereits in der Fehlerbaumanalyse vermutet, wurden nicht ein sondern mehrere relevante Einflussfaktoren gefunden. In der vorliegenden Arbeit konnte somit erstmals aufgezeigt werden, dass eine Kombination von Faktoren, die normgerecht ausgeführt wurden und einzeln nicht als ungünstig galten, zu einer erhöhten Gefährdung in einer Kurve führen können.

Mit den Resultaten aus den empirischen Datenanalysen konnte der zuvor theoretisch entwickelte Gefährdungsindex mit weiteren, gewichteten Faktoren ergänzt werden. Die Verteilung der Spurtypen, welche alleine zu wenig aussagekräftig ist, kann so in diesem Index berücksichtigt werden.

In der vorliegenden Untersuchung konnte der Gefährdungsindex aufgrund der geringen Datenmenge nicht überprüft werden. Mit neueren Technologien sollte es aber möglich sein, Spurdaten über einen längeren Zeitraum zu erfassen.

Das Ziel des Bundes, die Zahl der Unfälle noch weiter zu reduzieren, wird mit sinkender Anzahl der Unfälle immer aufwändiger und schwieriger. Die offensichtlichen Mängel an Infrastruktur und Fahrverhalten werden weniger. Massnahmen bedingen einen immer höheren finanziellen Einsatz bei kleinerem Nutzen. Der neue Ansatz, wie er hier gefunden wurde, könnte dazu beitragen, die Ziele von Via Sicura¹ zu erreichen.

¹ Verkehrssicherheitspaket Via Sicura - Handlungsprogramm des Bundes für mehr Sicherheit im Strassenverkehr, Bern 2012

Abstract

The aim of this work was to develop a correlation between trajectories of cars and accidents in curves. The focus was on the question whether a statement on accidents can be made by trajectories alone.

In addition to a literature review on the topic of trajectories and perception, curve geometry and curve equipment a systematically cause - effect mechanisms was determined using a fault tree analysis for different types of accidents. It was shown that an unambiguous assignment of influencing factor to a certain type of accident is impossible. Therefore, in a further step, accident and trajectory types were assigned to a specific section of the curve. This confirmed the assumption that some differences existed between the individual curve segments. With the obtained findings a theoretical index for the hazard of a curve could be developed.

With empirical data of accidents and trajectories the factors found in the fault tree analysis were examined. It has been shown that an existing security line, a narrow roadway and a single curve after a long straight stretch of the road can have a negative impact on both types of accidents as well as unfavourable trajectory types "reach out", "cutting", "adjust" and "drift off".

As already suggested in the fault tree analysis, not only a single but several relevant factors were found. In the present work it was demonstrated for the first time that a combination of factors that have been used according to standards and were not considered unfavourable individually, can lead to an increased risk in a curve.

With the results from the empirical data analysis, the previously developed theoretical hazard index could be supplemented with further weighted factors. The distribution of the trajectory types, which alone is not sufficiently significant, may be included in this index.

In the present study, the hazard index could not be verified due to the small amount of data. With newer technologies, it should be possible to detect trajectory data over a longer period of time.

The aim of the Swiss federal department of the environment, transport, energy and communication DETEC to reduce the number of accidents even further becomes more complex and difficult with a decreasing number of accidents. The obvious shortcomings in infrastructure and driver behaviour are becoming less. Measures require an ever-increasing financial input resulting in smaller benefits. The new approach, as found here, could help to achieve the objectives of Via Sicura².

² Verkehrssicherheitspaket Via Sicura - Handlungsprogramm des Bundes für mehr Sicherheit im Strassenverkehr, Bern 2012

Inhalt

1. EINLEITUNG	17
1.1. AUSGANGSLAGE.....	17
1.2. FRAGESTELLUNG.....	19
1.3. PROJEKTSSTRUKTUR.....	20
1.4. BEGRIFFE UND DEFINITIONEN	22
2. SPURVERHALTEN IN DER LITERATUR	26
2.1. ÜBERBLICK.....	26
2.2. FEHLVERHALTEN.....	26
2.3. SPURVERHALTEN UND FAHRER	28
2.3.1. Spurverhalten und visuelle Informationsaufnahme	28
2.3.2. Spurverhalten und Blickverhalten	29
2.3.3. Spurverhalten und Blickfeld.....	31
2.3.4. Spurverhalten und Erkennbarkeit einer Kurve	32
2.4. SPURVERHALTEN UND INFRASTRUKTUR.....	33
2.4.1. Spurverhalten und Strassenraum	33
2.4.2. Spurverhalten und Kurvigkeit	35
2.4.3. Spurverhalten und Markierung	36
2.5. SPURVERHALTEN UND VERKEHRSABLAUF	39
2.5.1. Spurverhalten und Geschwindigkeit.....	39
2.5.2. Spurverhalten in Bezug auf andere Verkehrsteilnehmer	41
2.6. FOLGERUNGEN AUS KAPITEL 2.....	41
3. HYPOTHESEN	44
3.1. HERLEITUNG DER HYPOTHESEN	44
3.2. SPURVERHALTEN IN UNTERSCHIEDLICHEN KURVEN	44
3.3. SPURVERHALTEN UND STRASSENRAUM	45
3.4. SPURVERHALTEN UND KURVENELEMENTE.....	45
3.5. SPURVERHALTEN BEI UNTERSCHIEDLICHEN GESCHWINDIGKEITSNIVEAUS.....	46
3.6. SPURVERHALTEN UND UNFALLGESCHEHEN	47
4. METHODIK	48
4.1. EINLEITUNG.....	48
4.2. LITERATURERECHERCHEN.....	48
4.3. FEHLERBAUMANALYSE	48
4.3.1. Anforderungen.....	48
4.3.2. Mögliche Methoden und Bestimmung der bestgeeignetsten Methode	49
4.3.3. Anwendung	51
4.4. EMPIRISCHE DATENERHEBUNG	52
4.4.1. Unfallgeschehen	52
4.4.2. Auswahl der Messstrecken	53
4.4.3. Messsystem	54
4.4.4. Auswertungsprogramm IVT-Spur.....	55
4.5. ROUGH SET ALGORITHMUS	56
4.6. SPSS 21.....	58
4.7. ÜBERSICHT ÜBER DIE VERWENDETEN METHODEN	58
5. EINSATZ DER FEHLERBAUMANALYSE	60

5.1.	GRUNDLAGEN	60
5.2.	SYSTEMANALYSE	61
5.2.1.	Komponenten des Gesamtsystems	61
5.2.2.	Zusammenhänge zwischen den Komponenten	62
5.2.3.	Komponenten	64
5.2.4.	Komponente Fahrer	64
5.2.5.	Komponente Fahrzeug	67
5.2.6.	Komponente Infrastruktur	69
5.3.	TEILSYSTEM UNFALLTYPEN	73
5.4.	FESTLEGUNG DES UNERWÜNSCHTEN EREIGNISSES UND DER AUSFALLKRITERIEN	74
5.5.	FESTLEGUNG DES ZEITINTERVALLS	76
5.6.	BESTIMMUNG DER AUSFALLARTEN DER KOMPONENTEN	77
5.7.	EXKURS FAHRDYNAMIK	78
5.7.1.	Einleitung	78
5.7.2.	Fahrzeugposition im Raum	78
5.7.3.	Bewegungsrichtung des Fahrzeuges in der Ebene (Einspurmodell)	80
5.7.4.	Fahrwiderstände	83
5.7.5.	Längs- und Querdynamik	88
5.7.6.	Physikalische Versagensart	91
5.8.	AUFSTELLUNG DES FEHLERBAUMS	94
5.9.	AUSWERTUNG DES FEHLERBAUMS UND ERGEBNISDISKUSSION	97
5.10.	PHYSIKALISCHE VERSAGENSART IM ZUSAMMENHANG MIT SPUR- UND UNFALLTYPEN	98
5.10.1.	Spurtypen	98
5.10.2.	Versagensart und Spurtyp	100
5.10.3.	Versagensart und Unfalltyp	107
5.10.4.	Spurtyp und Unfalltyp nach Lage Kurvenort	109
5.10.5.	Gefährdungsmatrix	112
5.11.	AUSWERTUNG DES FEHLERBAUMS UND ERGEBNISDISKUSSION	123
5.12.	FAZIT AUS KAPITEL 5	124
6.	EMPIRISCHE DATENERHEBUNGEN.....	129
6.1.	EINLEITUNG	129
6.2.	UNFALLGESCHEHEN	129
6.2.1.	Einleitung Unfallgeschehen	129
6.2.2.	Auswahl der Unfalldaten	129
6.2.3.	Unfalldaten aus Unfallaufnahmeprotokollen	130
6.2.4.	Vorgehen VUA	132
6.2.5.	Unfalltypen	133
6.2.6.	Unfalldaten	134
6.3.	MESSKURVEN	136
6.4.	SPURDATEN	139
6.4.1.	Messung	139
6.4.2.	Auswertung der Messdaten	140
6.5.	AUSWERTBARE EMPIRISCHE DATEN	144
6.5.1.	Unfalldaten	144
6.5.2.	Spurdaten	145
7.	AUSWERTUNGEN, STATISTIK	147
7.1.	GRUNDLAGEN	147
7.2.	GRUPPENBILDUNG DER ATTRIBUTE	147
7.2.1.	Gruppenbildung für die allgemeinen Attribute der Kurven	148

7.2.2.	Gruppenbildung der Attribute der Kurven während der Messung	161
7.2.3.	Gruppenbildung für die Attribute der einzelnen Fahrspuren	164
7.2.4.	Gruppenbildung für die Unfallattribute	166
7.3.	RESULTATE AUS DER AUSWERTUNG DER UNFALLDATEN	171
7.3.1.	Einleitung	171
7.3.2.	Methode der kritischen Unfallzahl	172
7.3.3.	Methode der Unfallraten.....	174
7.3.4.	Regressionsanalyse der Unfalldaten	176
7.3.5.	Resultate der Rough Set Analyse	192
7.3.6.	Fazit zu den Resultaten aus den Unfalldaten	198
7.4.	RESULTATE AUS DER AUSWERTUNG DER SPURDATEN	203
7.4.1.	Einleitung	203
7.4.2.	Regressionsanalyse der Spurdaten.....	203
7.4.3.	Tag-Nacht Vergleich	230
7.4.4.	Resultate der Rough Set Analyse der Spurdaten	236
7.4.5.	Zusammenfassung der Resultate aus den Spurdaten	241
8.	ZUSAMMENHÄNGE UND ERGEBNISDISKUSSION, BEANTWORTUNG DER HYPOTHESEN	247
8.1.	ALLGEMEINE AUSSAGEN ZU DEN RESULTATEN.....	247
8.2.	RESULTATE AUS DEN UNFALLDATEN	247
8.3.	RESULTATE AUS DEN SPURDATEN	251
8.4.	VERGLEICH DER BEIDEN AUSWERTUNGEN UNFALLDATEN UND SPURDATEN.....	254
8.5.	BEANTWORTUNG DER HYPOTHESEN UND OFFENE FRAGEN	259
9.	SYNTHESE	262
9.1.	BEANTWORTUNG DER FORSCHUNGSFRAGE	262
9.2.	DISKUSSION DER METHODIK UND DER ERGEBNISSE.....	263
9.3.	PRAKTISCHE EMPFEHLUNGEN	266
9.4.	WEITERER FORSCHUNGSBEDARF.....	267
ANHÄNGE	271	
ABKÜRZUNGEN	271	
A FEHLERBÄUME	272	
B MESSKURVEN	288	
C AUSWERTUNGEN UNFALLDATEN.....	292	
D AUSWERTUNGEN SPURDATEN	295	
LITERATURVERZEICHNIS.....	305	
LEBENS LAUF	312	

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: erste Erkenntnisse aus Literaturlauswertung	43
Tabelle 4-1: Weitere mögliche Methoden zur Systemanalyse.....	50
Tabelle 4-2: Resultat Regeln Rough Set Analyse	57
Tabelle 4-3: Verwendete Methoden (1/2)	58
Tabelle 4-4: Verwendete Methoden (2/2)	59
Tabelle 5-1: System	61
Tabelle 5-2: Strassentypen	69
Tabelle 5-3: Streckennetz nach Verkehrsträgern in Kilometern	70
Tabelle 5-4: Unfalltypen	73
Tabelle 5-5: Unfallursachen	75
Tabelle 5-6: Schlupf	84
Tabelle 5-7: Schräglaufwinkel und Unter- und Übersteuern.....	89
Tabelle 5-8: Physikalische Auslöser von Unfällen	93
Tabelle 5-9: Beispiel Gewichtung Kurvenort.....	113
Tabelle 5-10: Beispiel Gewichtung Endlage Unfallfahrzeug und Bewegungsart.....	114
Tabelle 5-11: Matrize mit Gewichtung Rechtskurve	115
Tabelle 5-12: Matrize mit Gewichtung Linkskurve	115
Tabelle 5-13: Beispiel Gefährdungsindex I	116
Tabelle 5-14: Sensitivität Gefährdungsindex I Linkskurve	117
Tabelle 5-15: Sensitivität Gefährdungsindex I Rechtskurve	118
Tabelle 5-16: unabhängige vs. abhängige Variablen	125
Tabelle 6-1: Unfalltypen	134
Tabelle 6-2: Beispiel Unfalldaten	135
Tabelle 6-3: Messkurven.....	136
Tabelle 6-4: Kurvendaten (Beispiele).....	138
Tabelle 6-5: Messkurven: empirische Unfalldaten für Auswertung	144
Tabelle 6-6: Messkurven Übersicht	145
Tabelle 6-7: Messkurven, Spurverteilung	146
Tabelle 7-1: Attribute je Kurve (allgemein).....	149

Tabelle 7-2: Radien und Projektierungsgeschwindigkeit.....	150
Tabelle 7-3: Sicht in Richtung Kurveninnenseite	154
Tabelle 7-4: DTV	158
Tabelle 7-5: Attribute je Kurven während der Messung	161
Tabelle 7-6: Attribute der einzelnen Fahrspuren	165
Tabelle 7-7: Attribute je Unfall.....	167
Tabelle 7-8: Attribute für die Kovarianzanalyse „Unfalltyp“	176
Tabelle 7-9: ANOVA „Unfalltyp“	177
Tabelle 7-10: lineare Regressionsanalyse „Unfalltyp“, Schritt 1	178
Tabelle 7-11: lineare Regressionsanalyse „Unfalltyp“, Schritt 2	179
Tabelle 7-12: lineare Regressionsanalyse „Unfalltyp“, Schritt 3	180
Tabelle 7-13: lineare Regressionsanalyse „Unfalltyp“, Schritt 4	180
Tabelle 7-14: Anzahl Regeln und Anzahl Unfälle Rough Set Algorithmus	193
Tabelle 7-15: Rough Set Analyse, Unfalltyp Accuracy	194
Tabelle 7-16: Rough Set Analyse, Unfalltyp Coverage	196
Tabelle 7-17: Einflussfaktoren Unfalltyp	198
Tabelle 7-18: mögliche weitere Faktoren für Gefährdungsindex I (Unfalltypen)	202
Tabelle 7-19: Konstanten für Kovarianzanalyse Unfalltyp	203
Tabelle 7-20: ANOVA „Spurtyp“	204
Tabelle 7-21: lineare Regressionsanalyse „Spurtyp“, Modell 1, Schritt 1	204
Tabelle 7-22: lineare Regressionsanalyse „Spurtyp“, Modell 1, ausgeschlossene Variablen.....	205
Tabelle 7-23: ANOVA „Spurtyp“, Modell 2	205
Tabelle 7-24: lineare Regressionsanalyse „Spurtyp“, Modell 2, Schritt 1	206
Tabelle 7-25: Regeln und Anzahl Spuren Rough Set Algorithmus.....	238
Tabelle 7-26: Rough Set Analyse, Spurtyp Accuracy*	239
Tabelle 7-27: Rough Set Analyse, Spurtyp Coverage*	240
Tabelle 7-28: Einflussfaktoren Spurtyp	242
Tabelle 7-29: mögliche weitere Faktoren für Gefährdungsindex I (Spurtypen)	246
Tabelle 8-1: Einflussfaktoren und Unfalltypen, Einflussgrösse.....	249
Tabelle 8-2: Einflussfaktoren und Unfalltypen	250
Tabelle 8-3: Einflussfaktoren und Spurtypen, Einflussgrösse	252

Tabelle 8-4: Einflussfaktoren und Spurtypen	253
Tabelle 8-5: Einflussfaktoren von Unfall- und Spurtypen.....	255
Tabelle 8-6: mögliche weitere Faktoren für Gefährdungsindex I	256
Tabelle 8-7: Gewichtung der weiteren Faktoren für Gefährdungsindex I	258
Tabelle B-1: Messkurven Übersicht	288

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Struktur der Arbeit	21
Abbildung 4-2: Messpfosten im Einsatz (linke Strassenseite)	55
Abbildung 4-3: Vorgehen Rough-Set-Algorithmus.....	56
Abbildung 5-1: Komponenten des Gesamtsystems	61
Abbildung 5-2: Modellierung einer Fahrt im Regelkreis „Fahrer-Fahrzeug-Strasse“	63
Abbildung 5-3: Komponente Fahrer	66
Abbildung 5-4: Komponente Fahrzeug	68
Abbildung 5-5: Komponente Infrastruktur	72
Abbildung 5-6: Krümmungsband einer Kurve.....	76
Abbildung 5-7: Fahrzeugachsen im Raum	78
Abbildung 5-8: Wankwinkel und Wankmoment	79
Abbildung 5-9: Schräglaufwinkel.....	80
Abbildung 5-10: Schwimmwinkel	81
Abbildung 5-11: Lenkwinkel.....	82
Abbildung 5-12: Kammscher Kreis	84
Abbildung 5-13: Krempelsche Reibungsellipse	85
Abbildung 5-14: Resultierende bei Schräglaufwinkel α und Schlupf λ	86
Abbildung 5-15: Seitenführungs- bzw. Reibungskraft	87
Abbildung 5-16: Fahrstabilität beim Bremsen.....	88
Abbildung 5-17: Untersteuern	90
Abbildung 5-18: Untersteuern, Gleiten	90
Abbildung 5-19: Übersteuern	91
Abbildung 5-20: Versagensart und Folgen	92
Abbildung 5-21: Fehlerbaum Übersicht	94
Abbildung 5-22: Fehlerbaum, Unfalltyp Schleuder-/Selbstunfall, ohne Kollision.....	96
Abbildung 5-23: Fehlerbaum mit Blackbox „Lenkfehler/Haftreibungsverlust“	98
Abbildung 5-24: Spurtypen und mögliche Lage der Fahrzeugachse	99
Abbildung 5-25: Modellvorstellung.....	101
Abbildung 5-26: gefahrener Radius	102

Abbildung 5-27: Lenkfehler und Haftreibungsverlust je Spurtyp.....	103
Abbildung 5-28: Versagensarten in Linkskurven	105
Abbildung 5-29: Versagensarten in Rechtskurven	106
Abbildung 5-30: Versagensart im Kurvenbereich und zugehöriger Unfalltyp	108
Abbildung 5-31: Spurtyp und Unfalltyp je Unfallort in Linkskurven	110
Abbildung 5-32: Spurtyp und Unfalltyp je Unfallort in Rechtskurven	111
Abbildung 5-33: Spinne Gefährdungsindex I, Rechtskurve	119
Abbildung 5-34: Spinne Gefährdungsindex I, Linkskurve	120
Abbildung 5-35: Spinne Gefährdungsindex I, einzelne Spurtypen mit erhöhter Häufigkeit.....	121
Abbildung 5-36: Spinne Gefährdungsindex I, zwei Spurtypen mit erhöhter Häufigkeit	122
Abbildung 5-37: Spinne Gefährdungsindex I, Beispiel Rechtskurve	128
Abbildung 6-1: Unfallaufnahmeprotokoll (Teil 1/2).....	130
Abbildung 6-2: Unfallaufnahmeprotokoll (Teil 2/2).....	131
Abbildung 6-3: Vorgehen verkehrstechnische Unfall-Analyse.....	133
Abbildung 6-4: Beispiel einer Messanordnung Rechtskurve, Messrichtung Hinverkehr	139
Abbildung 6-5: Beispiel Spurverläufe aus Fahrzeugverfolgung.....	141
Abbildung 6-6: Beispiel der einzelnen Fahrzeuge und Werte je Fahrzeug	142
Abbildung 6-7: Beispiel Kontrolltabelle zur Spurtypenunterscheidung	143
Abbildung 7-1: Kategorien der Winkeländerung einer Kurve.....	151
Abbildung 7-2: Sicht nach innen	155
Abbildung 7-3: Randmarkierungen	156
Abbildung 7-4: Mittellinie	156
Abbildung 7-5: Kurvenlage.....	157
Abbildung 7-6: Kurve mit Geschwindigkeitssignalisation.....	159
Abbildung 7-7: Strassenbeleuchtung in Kurven.....	160
Abbildung 7-8: Streckentyp	160
Abbildung 7-9: Dauer Fahrausweisbesitz Unfallverursacher.....	171
Abbildung 7-10: Anzahl Unfälle und kritische Unfallzahl	173
Abbildung 7-11: Anzahl Unfälle und kritische Unfallzahlen je Kurve	174
Abbildung 7-12: Unfallrate.....	175
Abbildung 7-13: Unfalltyp und durchgezogene Sicherheitslinie.....	182

Abbildung 7-14: Prozentuale Verteilung der Unfälle (alle Unfalltypen) nach Fahrstreifenbreite in Bogenmitte	183
Abbildung 7-15: Unfalltypen und Fahrstreifenbreite in Bogenmitte	184
Abbildung 7-16: Unfalltyp und Fahrstreifenbreite auf der Zufahrtsgeraden	185
Abbildung 7-17: Unfalltyp und Fahrstreifenbreite in Bogenmitte	186
Abbildung 7-18: Zusammenhang Breite in Bogenmitte und in der Zufahrtsgeraden	187
Abbildung 7-19: Unfalltyp und Sichtverhältnisse	188
Abbildung 7-20: Unfalltyp, Radius und Sichtverhältnisse	189
Abbildung 7-21: Unfalltyp, Radius und Krümmungsrichtung	190
Abbildung 7-22: Unfalltyp, Radius und Streckencharakteristik	191
Abbildung 7-23: Übersicht der Regeln Rough Set Algorithmus „Unfalltyp“	193
Abbildung 7-24: Coverage der Regeln Rough Set Algorithmus „Unfalltyp“	197
Abbildung 7-25: Spurtyp und Fahrstreifenbreite in Bogenmitte	207
Abbildung 7-26: Spurtyp und Fahrstreifenbreite der Zufahrtsgeraden	208
Abbildung 7-27: ΔV_{85} Zufahrt/Bogenanfang, Spurtyp und Sicht nach innen	210
Abbildung 7-28: ΔV_{85} Bogenanfang/Bogenmitte, Spurtyp und Sicht nach innen	211
Abbildung 7-29: ΔV_{85} Zufahrt/Bogenanfang und Sicht nach innen	212
Abbildung 7-30: ΔV_{85} Bogenanfang/Bogenmitte und Sicht nach innen	213
Abbildung 7-31: Sicherheitslinie und Spurtyp und ΔV_{85} Zufahrt/Bogenanfang	214
Abbildung 7-32: Sicherheitslinie und Spurtyp und ΔV_{85} Bogenanfang/Bogenmitte	215
Abbildung 7-33: Geschwindigkeitsdifferenzen und Spurtyp, Zufahrt/Bogenanfang	216
Abbildung 7-34: Geschwindigkeitsdifferenzen und Spurtyp, Bogenanfang/Bogenmitte	217
Abbildung 7-35: Geschwindigkeitsdifferenz V_{85} und Streckencharakteristik	218
Abbildung 7-36: Geschwindigkeitsdifferenz V_{85} und Streckencharakteristik	219
Abbildung 7-37: Spurtyp und R_{min}/R_{kurve}	220
Abbildung 7-38: Sicherheitslinie und R_{min}/R_{kurve}	221
Abbildung 7-39: Radius und Spurtyp	222
Abbildung 7-40: V_{85} in Abhängigkeit des Kurvenortes	223
Abbildung 7-41: ΔV Zufahrt-Bogenanfang in Funktion des Radius	224
Abbildung 7-42: ΔV Zufahrt-Bogenanfang in Funktion der Krümmungsrichtung	225
Abbildung 7-43: ΔV Bogenanfang-Bogenmitte in Funktion des Radius	226
Abbildung 7-44: Zusammenhang ΔV_m und ΔV_{85}	227

Abbildung 7-45: Rechtskurven mit/ohne Sicherheitslinie.....	228
Abbildung 7-46: Linkskurven mit/ohne Sicherheitslinie	229
Abbildung 7-47: Spurtypenverteilung Tag / Nacht	231
Abbildung 7-48: Vergleich der Summenkurven von gefahrenem (Rmin) zu Kurvenradius	232
Abbildung 7-49: Vergleich von gefahrenem zu Kurvenradius, Tag-Nacht, Links-Rechts.....	234
Abbildung 7-50: Vergleich von Vmax und Qmax bei Tag und Nacht.....	235
Abbildung 7-51: Vergleich Vmax und Qmax in Links- und Rechtskurven	235
Abbildung 7-52: Übersicht der Regeln Rough Set Algorithmus „Spurtyp“ (Ausschnitt mit Regeln Nr. 1 bis 67).....	237
Abbildung D-1: Sicherheitslinie, Streckencharakteristik und Spurtyp „Ideal“	295
Abbildung D-2: Sicherheitslinie, Streckencharakteristik und Spurtyp „Normal“	296
Abbildung D-3: Sicherheitslinie, Streckencharakteristik und Spurtyp „Korrigieren“	297
Abbildung D-4: Sicherheitslinie, Streckencharakteristik und Spurtyp „Ausholen“	298
Abbildung D-5: Sicherheitslinie, Streckencharakteristik und Spurtyp „Schneiden“	299
Abbildung D-6: Sicherheitslinie, Streckencharakteristik und Spurtyp „Hinaustragen“	300
Abbildung D-7: Sicherheitslinie, Streckencharakteristik und Spurtyp „Übrige“	301

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage

Die Anzahl der Verkehrsunfälle auf Schweizer Strassen hat in den letzten Jahren kontinuierlich abgenommen. Trotz des rückläufigen Trends ereignen sich in Kurvenbereichen, v.a. auf Strassen ausserorts, immer noch überdurchschnittlich viele Unfälle, oder diese Bereiche sind sogar eigentliche Unfallschwerpunkte. Der Anteil der Kurvenunfälle auf Ausserortsstrassen lag zwischen 1992 und 2003 bei rund 2/3, und auch der Anteil der Getöteten in Kurven lag bei rund 65% (Ewert, Eberling 2009). In Deutschland starben 2007 40% aller Getöteten auf Landstrassen in Kurven (Volkenhoff, Lank et al. 2009) und nur rund 20% in Geraden auf Ausserortsstrassen (Steyer 2004). Volkenhoff machte zudem die überhöhte und nicht angepasste Geschwindigkeit für viele Unfälle verantwortlich (Volkenhoff, Lank et al. 2009). Riemersma zitierte 1984 Unfalldaten aus Holland (Riemersma 1984), die aufzeigten, dass 60% der schweren Unfälle in Kurven durch Einzelfahrzeuge verursacht wurden, und in den USA ereigneten sich 40% der tödlichen Unfälle am Strassenrand in Kurven (Retting, Farmer 1998). Kanellaidis verwies auf eine britische Studie, welche besagt, dass die Unfallschuld in 65% von 2000 untersuchten Unfällen alleine beim Strassenutzer lag und nur in 24% der Fälle bei Fahrer und Strasse (Kanellaidis, Dimitropoulos 1994). Mintsis (Mintsis 1988) stellte in seiner Untersuchung fest, dass bei der Erarbeitung geeigneter Massnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit die Theorie der Sicherheitsforschung im Verkehrsingenieurwesen davon ausgeht, dass zwischen Verkehrs- und Unfallgeschehen auf Strassen Zusammenhänge bestehen. Deshalb kommt den Erhebungen des Fahrverhaltens und der Erforschung der Einflüsse auf das Unfallgeschehen eine grosse Bedeutung zu.

Die fahrdynamischen Vorgänge während einer Kurvenfahrt werden in der Regel durch das Geschwindigkeitsverhalten angenähert. Der Entwurf einer Linienführung von Strassen basiert aus Sicht der Projektierung im Wesentlichen auf möglichen oder gewünschten Geschwindigkeiten. Technische Normen enthalten aber vielfach Empfehlungen und Erfahrungswerte, die nicht auf empirischen Messungen im realen Verkehrsablauf abgestützt sind. Dies trifft auch auf Parameter der verschiedenen Projektierungselemente in Kurvenbereichen zu.

Die Erforschung der Geschwindigkeiten in Kurvenbereichen hat bisher keine Erkenntnisse bezüglich Hinweise aus dem Fahrverhalten für eine verbesserte Kurvengestaltung und hat in der Folge keine sichereren Kurven gebracht. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass das Spurverhalten, d.h. die gefahrenen Linien in einer Kurve, eher geeignet sein könnte, Zusammenhänge zwischen Fahrverhalten und Unfallgeschehen in Kurven zu erklären. Spacek stellt in diesen Zusammenhängen zwischen Verkehrs- und Unfallgeschehen das sogenannte Fehlverhalten in den Vordergrund (Spacek 1998). Unter dem Fehlverhalten werden Verstöße gegen das Strassengesetz und andere, für die momentanen Gegebenheiten nicht angemessene Fahrweisen, verstanden.

Als Gründe für ein Fehlverhalten nennt Fell (Fell 1976) physische oder physiologische Fehler wie Herzinfarkt, Krämpfe oder Hirnschlag etc., aber auch Zustände hervorgerufen durch Alkohol, Drogen, emotionale Belastung oder Müdigkeit. Fehlverhalten kann weiter durch fehlende Erfahrung, durch die Belastung durch ein neues Fahrzeug oder durch Strassenunkenntnis entstehen. Eine weitere Ursache kann widersprüchliches Verhalten oder eine Nebenbeschäftigung sein, z. B. ein Gespräch, ein Blick in die falsche Richtung oder generelle Unaufmerksamkeit. Zudem können Risikoverhalten wie Rasen, zu nahes Auffahren oder allgemein gefährliche Manöver in einem Fehlverhalten resultieren (Fell 1976). Aus Unfallzahlen kann auch darauf geschlossen werden, dass es eine Gruppe von Fahrern gibt, die entweder über ein übersteigertes subjektives Sicherheitsgefühl verfügt oder bewusst ein erhöhtes Risiko eingeht (Volkenhoff, Lank et al. 2009).

Ergibt sich aus Erhebungen in einem Abschnitt der Strasse eine Häufung des Fehlverhaltens, so kann dies laut Theorie als Hinweis auf eine potentielle Gefährlichkeit des betrachteten Strassenbereiches gedeutet werden.

1.2. Fragestellung

Bei der Erarbeitung von Sanierungsvorschlägen für Kurven mit einer erhöhten Unfallhäufigkeit, sogenannten Unfallschwerpunkten, musste man sich bisher auf die statistisch seltenen Unfallereignisse abstützen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die bis heute gefundenen Zusammenhänge (Spacek 1998) zwischen Spurverhalten und Unfallgeschehen aufgrund einer vergrösserten Stichprobe an Untersuchungsobjekten zu überprüfen und zu konkretisieren. Es soll die Frage beantwortet werden, ob die potentielle Gefährlichkeit einer Kurve alleine mit Hilfe des Spurverhaltens - oder zumindest besser als über das Geschwindigkeitsverhalten - erkannt werden kann und dadurch Sanierungsmassnahmen präventiv, d. h. bevor die Gefährlichkeit einer Kurve durch geschehene Unfälle bewiesen worden ist, angeordnet werden könnten. Die in dieser Arbeit angestrebte Festlegung von Faktoren und Schwellenwerten, die zu bestimmten Spurtypen führen und die wiederum als Indikatoren für die Häufigkeit des Fehlverhaltens dienen könnten, bei deren Überschreitung eine erhöhte Gefährdung im Kurvenbereich zu erwarten ist, hat eine wichtige praktische Bedeutung für die Sicherheitsarbeit. Bei der Erarbeitung von Sanierungsvorschlägen müsste man sich künftig nicht wie bisher auf die statistisch seltenen Unfallereignisse abstützen. Die Gefährlichkeit eines Kurvenbereiches könnte aufgrund der erhobenen Struktur des Spurverhaltens beurteilt werden, und das, bevor dort statistisch gesehen „genügend“ Unfälle geschehen, um als Unfallschwerpunkt erkannt zu werden. Die Sanierungsmassnahmen könnten somit präventiv angeordnet und es könnten dadurch zukünftige Unfall- und Unfallfolgekosten „eingespart“ werden.

Weiter könnten aus den Resultaten dieser Arbeit sogar wichtige, sicherheitsorientierte Gestaltungsempfehlungen und Richtwerte für die Projektierungsnormen abgeleitet werden. Aus dem Zusammenhang zwischen Projektierungsgrössen und Spurverhalten sowie Spurverhalten und Unfalltypen kann möglicherweise direkt von den Projektierungsgrössen auf die Unfalltypen

geschlossen werden, ohne dass das zugehörige Spurverhalten bekannt sein muss.

Mit dieser Arbeit soll daher folgende Frage beantwortet werden:

Kann anhand der Struktur des Spurverhaltens einer Kurve auf einen Zusammenhang zwischen Unfallgeschehen und Spurverhalten geschlossen werden? Und wenn ja, wie sieht diese Verteilung der Spurtypen aus?

Die Antwort auf die oben stehende Frage bedingt die Beantwortung der folgenden Teilfragen:

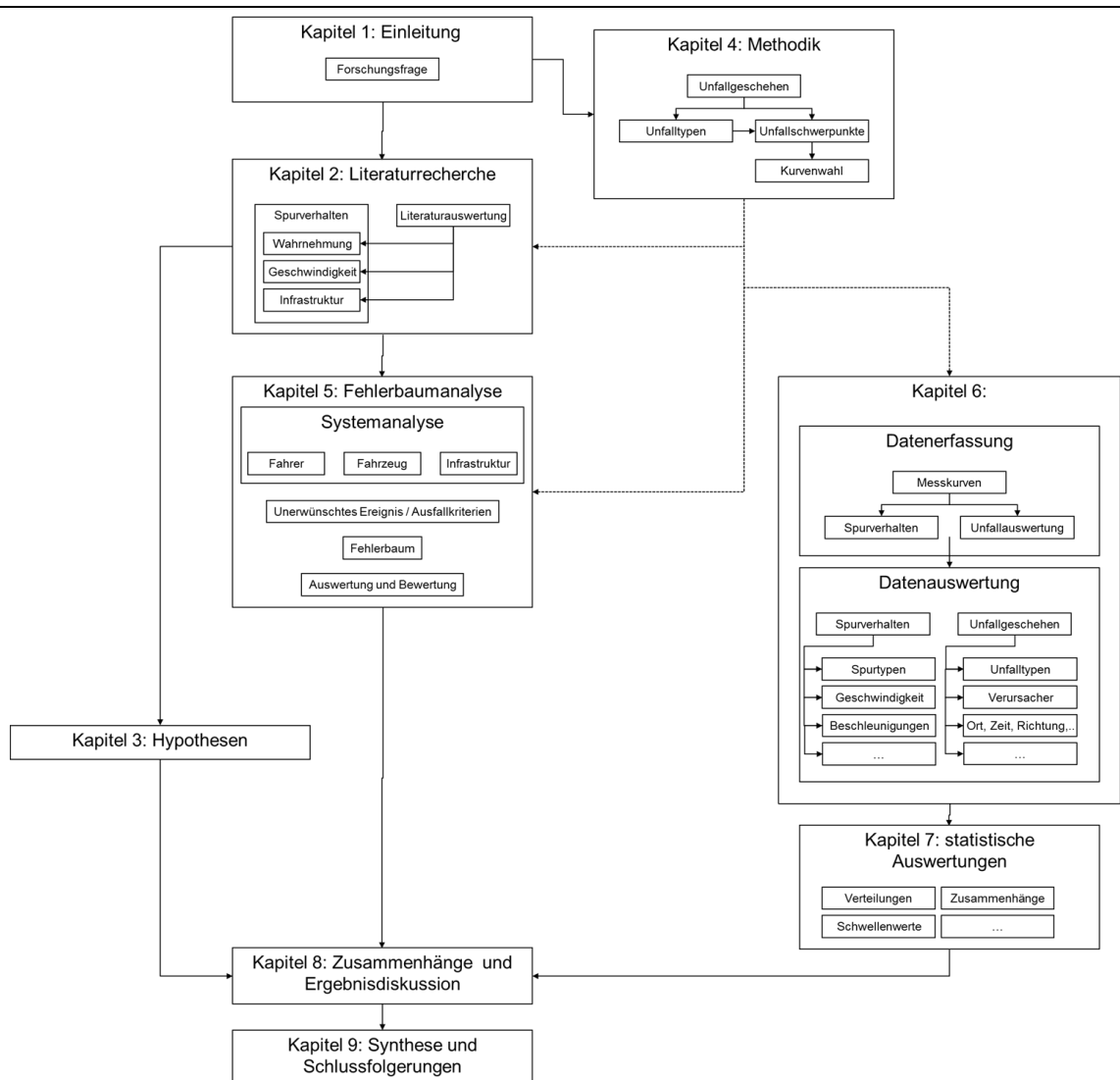
- 1. Ergeben sich signifikant unterschiedliche Häufigkeiten von bestimmten Spurtypen in unterschiedlichen Kurven?*
- 2. Welche geometrischen Elemente einer Kurve sind massgebende Faktoren für ein bestimmtes Spurverhalten?*
- 3. Kann ein Einfluss des gesamten Strassenraumes, d.h. Strasse und ihre unmittelbare Umgebung, auf die Spurverteilung in einer Kurve erkannt werden?*
- 4. Kann ein Einfluss einer Strecke mit mehreren Kurven auf die Spurverteilung einer einzelnen Kurve dieser Strecke abgeleitet werden?*
- 5. Welche Zusammenhänge können zwischen dem Geschwindigkeitsniveau einer Kurve und dem Spurverhalten abgeleitet werden?*
- 6. Welche Zusammenhänge bestehen zwischen dem Unfallgeschehen einer Kurve und der Struktur der Spurverteilung?*

1.3. Projektstruktur

Einen Überblick über den schematischen Ablauf der vorliegenden Arbeit gibt die Abbildung 1-1. Die in Kapitel 1.2 erwähnten Fragen führen in einem ersten Schritt zur Durchführung einer vertieften Literaturrecherche. In Kapitel 3 werden die Hypothesen aufgestellt. Eine Erläuterung der Methodik folgt in Kapitel 4. Kapitel 5 gibt einen Überblick über das Gesamtsystem „Fahrer-Fahrzeug-Infrastruktur“. In diesem Kapitel werden eine Fehlerbaumanalyse durchgeführt sowie weitere Überlegungen zu Unfallgeschehen und Spurverhalten angestellt.

Kapitel 6 behandelt die empirische Datenerhebung des Spurverhaltens und die Analyse der Unfalldaten. Weiter folgen statistische Auswertungen der Messungen in Kapitel 7 sowie eine Diskussion der Ergebnisse und Zusammenhänge in Kapitel 8. Kapitel 9 bildet die Synthese der Arbeit.

Abbildung 1-1: Struktur der Arbeit



Quelle: eigene Darstellung

1.4. Begriffe und Definitionen

Strassenkurve oder Kurve

Unter Kurve versteht man einen Strassenabschnitt mit einer Richtungsänderung. Eine Kurve besteht idealerweise aus einem Kreisbogen und beidseitigen Übergangsbögen.

Spurverhalten

Unter dem Spurverhalten versteht man die laterale Position eines Fahrzeuges während der Durchfahrt einer Kurve. Beim Spurverhalten besteht immer ein Zusammenhang zwischen seitlichem Abstand vom Fahrbahnrand, der gefahrenen Geschwindigkeit und der Querbeschleunigung.

Spurtypen

Es wird zwischen den sechs eindeutig definierten Spurtypen „Ideal“, „Normal“, „Schneiden“, „Ausholen“, „Hinaustragen“, „Korrigieren“ sowie den Spurtypen „Übrige“, die keine eindeutigen Merkmale aufweisen, unterschieden (Spacek 1998). Die Definitionen der einzelnen Spurtypen wurden von Spacek (Spacek 1998) übernommen.

Erwünschte Spurtypen:

- „*Idealverhalten* entspricht einem symmetrischen Spurverlauf in einem engen Bereich entlang der Fahrstreifenmitte.“ (Spacek 1998, Seite 20)
- „*Normalverhalten* weist ebenfalls einen symmetrischen Spurverlauf entlang der Fahrstreifenmitte auf, jedoch in einem etwas breiteren Bereich als beim Idealverhalten und mit leichtem Einschneiden zur Kurveninnenseite, ohne dass die Fahrzeuge die Mittellinie berühren.“ (Spacek 1998, Seite 20)

Nicht erwünschte Spurtypen:

- „*Korrigieren*: S-förmiger Spurverlauf mit zunehmendem Hinaustragen zur Kurvenaussenseite und anschliessender Lenkeinschlagskorrektur

in der zweiten Kurvenhälfte (unbewusster Fahrvorgang).“ (Spacek 1998, Seite 20)

- „*Schneiden*: Spurverlauf mit starkem Einschneiden zur Kurveninnenseite im Bereich des Kreisbogens (bewusster Fahrvorgang).“ (Spacek 1998, Seite 20)
- „*Ausholen*: Asymmetrischer Spurverlauf zwischen Beginn und Ende der Kurve.“ (Spacek 1998, Seite 21) Mit ausgeprägtem Fahren im äusseren Bereich der Fahrbahn zu Beginn der Kurve und Einschneiden bis zum Kurvenende.
- „*Hinaustragen*: Asymmetrischer Spurverlauf zwischen Beginn und Ende der Kurve.“ (Spacek 1998, Seite 21) Hinaustragen entspricht dem gegenteiligen Verlauf beim „Ausholen“. Zuerst Fahrt im Bereich der Kurveninnenseite und bis zum Kurvenende eine Fahrt zur Kurvenaussenseite hin.

Nicht näher definierter Spurtyp:

- „*Übrige*“: Diesem Spurtyp werden alle Spuren zugeordnet, welche nicht einem der übrigen sechs Typen entsprechen, d.h. Spuren, die die Definition des Spurverlaufes eines oben beschriebenen Spurtyps an mindestens einem Ort in der Kurve verletzen.

Fahrverhalten

Der Begriff Fahrverhalten umschreibt alle Bewegungen im Zusammenhang mit dem Lenken eines Fahrzeuges. Es beinhaltet sowohl die Handlungen des Fahrzeuglenkers als auch die daraus resultierenden Bewegungen des Fahrzeuges im Strassenraum. Empirisch erfasst werden nur die Fahrzeugbewegungen.

Fehlverhalten

Unter dem Begriff Fehlverhalten versteht man ein bewusst oder unbewusst in Kauf genommenes Fahrverhalten, welches im Grenzbereich einer noch als sicher zu betrachtenden Fahrweise liegt. Ein solches Fehlverhalten kann im ungünstigsten Fall zu einem Unfall führen.

Unfall

Im Bundesgesetz über den allgemeinen Teil des Sozialversicherungsrechts wird ein Unfall in Artikel 4³ wie folgt definiert: „*Unfall ist die plötzliche, nicht beabsichtigte schädigende Einwirkung eines ungewöhnlichen äusseren Faktors auf den menschlichen Körper, die eine Beeinträchtigung der körperlichen, geistigen oder psychischen Gesundheit oder den Tod zur Folge hat.*“ Weiter kann ein Unfall, wie er in der vorliegenden Arbeit definiert ist, auch nur Sachschaden zur Folge haben.

Fastunfall

„*Als Fastunfall werden die schweren Verkehrskonflikte bezeichnet, bei welchen der Unfall durch entsprechende Reaktion der Beteiligten verhindert werden kann.*“⁴

Unfallgeschehen

Das Unfallgeschehen⁵ umschreibt die Gesamtheit aller Unfälle, die sich auf einem definierten Streckenabschnitt oder Netz während einer bestimmten Zeitperiode ereignet haben. Für jeden Unfall werden Unfalltyp, Ort, Unfallverursacher und beteiligte Personen, Unfallzeit und -schwere sowie weitere Parameter erfasst.

Unfallhäufigkeit

Die Unfallhäufigkeit oder Unfallzahl beschreibt die Zahl der Unfälle auf einem längenmässig definierten Streckenabschnitt während einer definierten Zeit⁶.

³ SR 830.1 ATSG Art. 4, BG über den allgemeinen Teil des Sozialversicherungsrechtes

⁴ SN 640 010 Strassenverkehrsunfälle; Unfallanalysen sowie Kurz-, Gefahren- und Risikoanalysen, VSS Zürich, 2001

⁵ SN 640 010 Anhang, Strassenverkehrsunfälle; Unfallanalysen sowie Kurz-, Gefahren- und Risikoanalysen, Beispiele, VSS Zürich, 2002

⁶ SN 640 007 Strassenverkehrsunfälle; Unfallzahlen, Unfallstatistiken, Unfallkosten, VSS Zürich, 1999

Fehlerbaumanalyse

Eine Fehlerbaumanalyse dient dazu, das mögliche Versagen von technischen Systemen zu analysieren und die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall zu berechnen. Ausgehend von einem theoretischen Versagensfall werden alle möglichen Ursachen systematisch aufgeführt⁷.

⁷ DIN EN 61025:2007-08 Fehlzustandsbaumanalyse

2. Spurverhalten in der Literatur

2.1. Überblick

In der folgenden Literaturanalyse wird versucht, das Spurverhalten anhand psychologischer und verkehrstechnischer Aspekte zu beschreiben und zu analysieren. Einerseits wird das Spurverhalten durch das Fahrverhalten des Lenkers bestimmt, andererseits ist es eine Folge der vorhandenen Infrastruktur und teilweise des Verkehrsablaufs.

2.2. Fehlverhalten

Eines der schwierigsten Probleme im Bereich von Kurven ist die Unterscheidung zwischen Fehlverhalten der ersten Art, welches in bewusster, oft spekulativer Absicht – und unter erhöhter Risikobereitschaft – erfolgt und solchen der zweiten Art, die eher auf unbewusste bzw. unbeabsichtigte Handlungen oder auf mangelnde Informationen oder fehlende Konzentration zurückgeführt werden können.

Nur bei Fehlverhalten der zweiten Gruppe darf angenommen werden, dass Unsicherheiten in der Fahrweise zumindest indirekt durch die Anlage der Strasse entstehen, bzw. dass das visuelle Erscheinungsbild des vorausliegenden Strassenraumes die Fahrer zum Fehlverhalten verleitet. Bei Erhebungen in Kurven, die sich nur auf das Geschwindigkeitsverhalten stützen, ist die erwähnte Unterscheidung kaum möglich. Dementsprechend oft scheitern die Versuche, welche die Zusammenhänge zwischen Fehlverhalten, Streckencharakteristik und Unfallgeschehen allein über die Geschwindigkeiten erklären wollen.

Die Erforschung des Fahrverhaltens auf Strassen bildete seit Jahrzehnten einen wichtigen Schwerpunkt am IVT⁸. Bereits zu Beginn der 70er-Jahre wurden am Institut erste Untersuchungen zum Geschwindigkeitsverhalten in

⁸ Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme der ETH Zürich

Kurven durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurden jedoch mangels geeigneter Messeinrichtungen keine Spurverläufe betrachtet. Seitdem wurde am IVT eine Vielzahl von Forschungsprojekten bearbeitet, mit dem Ziel, die Projektierungsnormen weiter zu entwickeln. Das Spurverhalten wurde ebenfalls in ausländischen Forschungsarbeiten bereits früher thematisiert. Exemplarisch können die Arbeiten von Glennon (Glennon, Weaver 1971) und Good (Good 1978) sowie von Burger (Burger 1977) und von Brilon/Döhler (Brilon, Döhler 1978) genannt werden. Die letzteren zwei Arbeiten beschränkten sich aber nur auf die Spurverteilung in einzelnen Querschnitten, ohne die gesamten Spurverläufe entlang der Kurven einzubeziehen. Die ersten Versuche zur vollständigen Abbildung der Fahrzeugtrajektorien wurden in den 90er-Jahren in den Arbeiten von Diaz/Domingo/Garcia (1996) und Garcia/Diaz (2000) unternommen.

Bei bisherigen Untersuchungen des IVT wurden Spurverläufe einzelner Fahrzeuge beim An- und Durchfahren von Kurven rekonstruiert und ein erster Versuch zur Typisierung vorgenommen (Spacek 1998). Die Analysen haben angedeutet, dass das Spurverhalten möglicherweise besser geeignet ist als die Geschwindigkeit, um die eingangs erwähnten Zusammenhänge zu erklären. Denn laut einer Untersuchung von Rosey, der auf Riser verweist, ist eine ungünstige Spurposition eine der Hauptursachen für Unfälle (Rosey, Auberlet et al. 2008).

Mängel der Infrastruktur sind ebenfalls nicht immer auf den ersten Blick, wenn überhaupt, zu erkennen. Alle diese Punkte führen dazu, dass für die Analyse der Unfälle und Fastunfälle eine Methode benötigt wird, welche mögliche Ursachen systematisch analysiert. Dazu eignet sich die sogenannte Fehlerbaumanalyse. Weil auch Fastunfälle gemäss Shinar (Shinar 1984) aus den gleichen Gründen geschehen wie Unfälle, können sie mit dieser Methode ebenso analysiert werden.

Unfälle sind statistisch gesehen seltene Ereignisse und häufig sind genaue Unfallursache und oft auch der tatsächliche Unfallverlauf unklar. Es besteht keine Möglichkeit, mit den Unfallverursachern direkt zu sprechen, und die Aussagekraft der hier verwendeten polizeilichen Unfallprotokolle ist zum Teil gering.

Eine weitere Ungenauigkeit könnte darin bestehen, dass die erfassten und in dieser Arbeit ausgewerteten Unfälle nicht aus dem Kollektiv der gemessenen

Spurdaten stammen. Während des Zeitraums der hier durchgeführten Messungen ereignete sich glücklicherweise kein einziger Unfall.

Die bisherigen Erkenntnisse deuten darauf hin, dass die Ursache der in Kurven häufigen Selbst- und Schleuderunfälle nicht allein auf die oft genannte „überhöhte Geschwindigkeit“ zurückgeführt werden kann. Für die lokal erhöhten Querschleunigungen und Überbeanspruchungen der Reibungswiderstände sind primär die bei bestimmten Spurtypen vorgenommenen Lenkkorrekturen verantwortlich. Ähnliche Vermutungen wurden schon in den 80er-Jahren in verkehrspsychologischen Untersuchungen geäußert (Friedinger 1980, 1984).

2.3. Spurverhalten und Fahrer

2.3.1. Spurverhalten und visuelle Informationsaufnahme

Ein Fahrer erhält mehr als 90% seiner Informationen über die optische (Höfner, Hoskovec 1973), (Kayser, Möhler et al. 1985) und weniger als 10% über akustische und haptische Wahrnehmung. Donges schreibt, dass nur die visuelle Informationsaufnahme dem Fahrer die Wahrnehmung der Fahrzeuglage relativ zur Strasse ermöglicht (Donges 1975). Ein und derselbe Fahrer zeigt auf denselben Streckenabschnitten bei gleicher Geschwindigkeit das gleiche Blickverhalten (Höfner, Hoskovec 1973).

Das Gesichtsfeld beschreibt den Teil der Umgebung, der ohne die Augen zu bewegen, foveal und peripher wahrgenommen werden kann. Steyer verweist auf Biedermann (Steyer 2004), der eine Grösse des Gesichtsfeldes unter optimalen Bedingungen von ca. 130° in der Vertikalen und 180°-220° in der Horizontalen angibt. Das Blickfeld, der Teil des Gesichtsfeldes, in dem scharfes Sehen durch Drehen der Augen möglich ist, beträgt horizontal und vertikal je ca. 45° (Steyer 2004).

Land und Horwood beschreiben in ihrer Studie, dass für das erfolgreiche Steuern eines Fahrzeuges sowohl entfernte Strassenbereiche, welche Informationen über die Strassenkrümmung geben, als auch nähere Bereiche zur exakten Bestimmung der Spurposition benötigt werden (Land, Michael, Horwood 1995).

Die Forscher zeigen auf, dass man ein Fahrzeug mittels zweier verschiedener Strategien steuern kann. Erstens kann man aus den visuellen Informationen ein Mass für die bevorstehende Kurvenkrümmung ableiten. Der Blickwinkel α vergrössert sich, wenn sich die Blickdistanz vergrössert, es ergibt sich also eine bessere Strassenerkennung von einem weiter entfernten Punkt her. Die zweite Strategie des Lenkens betrifft die Spurhaltung. Wenn man den Strassenrand fixiert, kann man den seitlichen Abstand durch den Winkel zwischen der Blickrichtung und der Fahrtrichtung abschätzen. In diesem Fall verkleinert sich der Winkel α , wenn die Blickdistanz grösser wird (Land, Michael F., Horwood 1998).

Ein Modell für die Kurvenfahrt beruht auf der Annahme, dass ein Fahrer versucht, die Winkeländerung θ zwischen der momentanen Fahrtrichtung und der Richtung des Tangentenpunktes zu minimieren (Land, Michael, Horwood 1995; Coutton-Jean, Mestre et al. 2009).

Andere Modelle gehen davon aus, dass ein Fahrer durch seine Fahrpraxis eine Häufigkeitsverteilung von fahrrelevanten Informationen besitzt. Wenn er nun eine vorausliegende Kurve vorfindet, welche seinen gespeicherten Informationen entspricht, wird er diese mit hoher Wahrscheinlichkeit problemlos durchfahren (Dilling 1973).

2.3.2. Spurverhalten und Blickverhalten

Verschiedene Autoren gehen davon aus, dass erfahrene Lenker fähig sind, fahrrelevante Objekte rascher zu erfassen, besser zwischen wichtigen und unwichtigen Objekten zu unterscheiden und schneller von einzelnen Hinweisen auf das gesamte Verkehrsgeschehen schliessen zu können (Dilling 1973; Cohen 1985; Underwood, Chapman et al. 1999). Mourant und auch Höfner schreiben in ihren Studien (Mourant, R.R., Rockwell 1972; Höfner, Hoskovec 1973), dass Neulenker wichtige Informationen foveal erfassen müssen, d.h. sie müssen ein relevantes Objekt direkt anschauen, während erfahrene Lenker dies peripher können und den Blick in dieser Zeit immer auf das Verkehrsgeschehen vor ihnen richten.

Um die benötigten Information immer foveal erfassen zu können, macht das Auge eine Sakkade, einen Sprung von einem Fixationspunkt zum nächsten. In dieser Zeit kann ein Lenker ein Objekt nicht scharf sehen. Insgesamt

benötigen Sakkaden etwa 5% der gesamten Sehzeit (Höfner, Hoskovec 1973). Im Normalfall dauern Fixationen von Objekten zwischen 0.25 und 0.8 Sekunden, bei ermüdeten Fahrern können sie bei über 3s liegen, zusammengesetzt aus mehreren ganz kleinen Sakkaden (Höfner, Hoskovec 1973).

Es scheint, dass ein Fahrer mit zunehmender Erfahrung in der Lage ist, sich auf die fahrrelevanten Objekte und wichtigen Informationen zu konzentrieren und dadurch die Belastung der Informationsverarbeitung zu senken (Cohen 1985). Auch laut Dilling weist der erfahrene Lenker geringe mittlere Blickwinkeländerungen und geringe Streuungen der Blickwinkeländerungen auf (Dilling 1973). Ein erfahrener Lenker hat also mehr freie Kapazität, um neue oder gefährliche Situationen, z.B. in einer Kurvenfahrt, zu erfassen und zu verarbeiten.

Diese Annahmen werden auch gestützt durch die langen mittleren Fixationszeiten mit grosser Streuung, welche die erfahrenen Lenker aufweisen. Zudem fixieren sie meistens entfernte Objekte, welche der Richtungsorientierung dienen (Dilling 1973). Gleiches beobachtete Cohen (Cohen 1985), der schreibt, dass Fahrer mit einer Fahrpraxis von weniger als 5 Jahren eher Bereiche im Annäherungsbereich einer Kurve näher vor dem Fahrzeug betrachten als die routinierten Lenker.

Es zeigten sich je nach Fahrpraxis unterschiedliche Blickverhalten beim Befahren einer Kurve. Erfahrene Lenker schauten vor der Kurveneinfahrt eher auf den rechten Strassenrand als die weniger erfahrenen; ab Kurvenbeginn wurden von den erfahrenen Lenkern wieder entferntere Stellen in der Nähe des Fluchtpunktes (Cohen 1985) betrachtet. Juergensohn testete Probanden in einem Fahrsimulator und beobachtete ein Blickverhalten wie ein Sägezahnmuster. Die Fahrer fixierten einen Punkt in der Ferne, fixierten diesen während der Weiterfahrt und fixierten dann wieder einen weiter entfernten Punkt, mit Vorausschaudistanzen zwischen 10 und 35m (Jürgensohn, Neculau et al. 1991). Optimalerweise betrachtet ein Lenker bei 60 km/h einen Punkt, der ca. 11.4m oder 0.68s voraus liegt (Land, Michael, Horwood 1995).

Die Amplitude der Blickbewegungen ist bei weniger erfahrenen Lenkern in einer Kurve mit 4.79° grösser als bei den Erfahrenen mit 3.88° (Cohen 1985). Underwood et. al. fanden heraus, dass alle Lenker in einer

Kurvenfahrt den Tangentenpunkt (Tangente an den inneren Fahrbahnrand durch den Fahrer) fixierten, mit dem Unterschied, dass erfahrenere Lenker diesen Tangentenpunkte weniger oft, aber exakter betrachteten als die unerfahreneren Lenker (Underwood, Chapman et al. 1999). Ev. können erfahrenere Lenker ihre Spurposition durch die Betrachtung des Tangentenpunktes schneller bestimmen als die unerfahrenen und benötigen diese Information so weniger oft.

2.3.3. Spurverhalten und Blickfeld

Im seitlichen Bereich des Blickfeldes, d.h. peripher, ist die Winkelgeschwindigkeit grösser als im zentralen, fovealen Bereich. Seitlich bewegen sich Objekte pro Zeiteinheit mehr als solche, die direkt vor dem Fahrer liegen und machen die Geschwindigkeit besser sichtbar (Mourant, Ronald R., Rockwell 1970).

Sowohl alkoholisierte als auch ermüdete Fahrer haben ein eingeeengtes Gesichtsfeld (Höfner, Hoskovec 1973) und das Blickverhalten verschiebt sich mehr gegen den rechten Fahrbahnrand und näher zum Fahrzeug hin als bei normalen, unbeeinflussten Bedingungen (Mourant, Ronald R., Rockwell 1972; Höfner, Hoskovec 1973). Aufgrund des eingeeengten Blickfeldes werden fahrrelevante Objekte im Strassenraum eher foveal betrachtet. Die Geschwindigkeit wird aber generell genauer peripher erfasst (Mourant, Ronald R., Rockwell 1970), dieser äussere Teil des Blickfeldes fehlt bei Ermüdung. Laut einer Studie von Höfner (Höfner, Hoskovec 1973) können müde Fahrer ihre Geschwindigkeit daher schlechter abschätzen, es entsteht ein sogenannter Tunneleffekt. Mourant (Mourant, Ronald R., Rockwell 1972) nimmt an, dass das Blickverhalten sich mit zunehmender Ermüdung demjenigen von Neulenkern angleicht. Neulenker betrachten einen Punkt vor dem Fahrzeug, der weiter rechts (Mourant, Ronald R., Rockwell 1972; Höfner, Hoskovec 1973) und näher beim Fahrzeug (Cohen 1985) liegt als bei erfahrenen Lenkern.

Der oben erwähnte „Tunneleffekt“, bei welchem nur noch Informationen aus dem zentralen Blickfeld wahrgenommen werden, entsteht nicht nur bei Müdigkeit, sondern auch bei höheren Geschwindigkeiten. Allerdings geht Bartmann davon aus, dass in diesem speziellen Fall einfach eine

„Optimierung der Aufnahmekapazität“ erfolgt und nur noch fahrrelevante Informationen verarbeitet werden (Bartmann, Spijkers et al. 1991).

Je grösser das vorhandene Blickfeld ist, desto grösser ist die durchschnittlich geschätzte subjektive Geschwindigkeit in Kurven (Osaka 1991). Zudem benötigt ein Lenker die Sichtbarkeit sowohl von nahen wie auch von entfernten Strassenbereichen, um bei mittleren bis hohen Geschwindigkeiten sein Fahrzeug fehlerfrei und exakt zu lenken (Land, Michael, Horwood 1995). Land und Horwood zeigten, dass die entfernten Bereiche dazu benutzt wurden, um die Strassenkrümmung abzuschätzen, und die nahen Bereiche vor allem dazu dienten, um Informationen über die Lage des Fahrzeuges in der Fahrspur zu erhalten (Land, Michael, Horwood 1995).

Das Spurverhalten wird primär durch Informationen aus dem peripheren Sehfeld geregelt (Dilling 1973; Höfner, Hoskovec 1973).

2.3.4. Spurverhalten und Erkennbarkeit einer Kurve

Appelt befasste sich mit der Wahrnehmung von Kurven im dreidimensionalen Raum (Appelt, Weise 1999). Er fand heraus, dass Kurven mit hoher Querneigung einerseits grosszügiger wirken, dass aber andererseits auch die Abbildungsverzerrung grösser wird. Weiter betrachtete er das Verhältnis zwischen Lageplanradius R_G (Radius in der horizontalen Ebene) und Gradientenhalbmesser H (Krümmungsradius beim Schnittpunkt von zwei Tangenten im Längenprofil, Kuppen/Wannen). Er fand heraus, dass je grösser dieser Wert von $R_G : H$ ist (R gross und H klein), desto grösser die Abbildungsverzerrung Kuppen- und Wannenkurven sei (Appelt, Weise 1999). Eine solche Abbildungsverzerrung lässt Kurven auf Kuppen oder in Wannen gestauchter oder gestreckter erscheinen, als sie es in der Tat sind (Appelt, Weise 1999).

Die Gefährlichkeit einer Kurve in Abhängigkeit ihrer Erkennbarkeit wird schon während der Annäherung an die Kurve erfasst (Steyer 2004). Ein Fahrer versucht vor allem die horizontale Krümmung der Strasse abzuschätzen (Donges 1975). Elvik erwähnt eine Studie von Matthews und Barnes von 1988, die zeigt, dass die Unfallraten in Kurven mit Radien kleiner 200m markant ansteigen, wenn solche Kurven auf einer Strecke weniger oft auftreten. Erwartet ein Fahrer aber scharfe Kurven, da er auf dem

Streckenabschnitt zuvor bereits mehrere solche Kurven befahren hat, so erfolgte kein Anstieg der Unfallraten (Elvik 2006).

2.4. Spurverhalten und Infrastruktur

2.4.1. Spurverhalten und Strassenraum

Sowohl Brilon (Brilon, Döhler 1978) als auch Friedinger (Friedinger 1982) geben an, dass sich das Verhalten des Fahrers nach dem optischen Erscheinungsbild des Strassenraumes richtet. Dieses optische Erscheinungsbild wird u.a. durch die Fahrbahnbreite und die Seitenraumbepflanzung erzeugt.

Das Spurverhalten ist somit nicht zuletzt auch geprägt durch die Wahrnehmung der Strasse mit ihren geometrischen Eigenschaften und Markierungen sowie des angrenzenden Strassenraumes. Zu den sichtbaren geometrischen Eigenschaften einer Kurve gehört z.B. die Summe der Winkeländerung (Kurvigkeit), d.h. die Frage, ob sich die Fahrrichtung nur leicht ändert oder ob die Kurve zu einer starken Richtungsänderung führt. Damit verbunden sein kann eine geänderte Sonneneinstrahlung und unter Umständen eine schlechtere Erkennbarkeit der Strasse wegen Sonnenblendung. Dies könnte zu einer Unsicherheit des Fahrzeuglenkers bezüglich der exakten Position seines Fahrzeuges auf der Fahrbahn und damit zu einer plötzlichen Lenkkorrektur führen.

Der Strassenraum, d.h. die Fahrbahn und der angrenzende Raum, können das Fahrgefühl eines Lenkers positiv oder negativ beeinflussen. Ein weiter, gleichmässiger und ebener Strassenraum kann das Gefühl von Sicherheit und einfach zu bewältigender Fahrt vermitteln, während ein abfallendes Bankett oder viele Bäume nahe des Strassenrandes eher zu einer aufmerksameren Fahrt führen.

Lippold fand in einer Studie heraus (Lippold, Dietze et al. 2006), dass eine Sichtbehinderung durch Bepflanzung in der Kurveninnenseite weniger „Kurvenschneiden“ zur Folge hat. In derselben Studie wurde untersucht, welche Auswirkungen eine einseitige Baumreihe in der Kurvenaussenseite hat. Der Spurtyp „Kurvenschneiden“ war weniger häufig anzutreffen, wenn in der Kurvenaussenseite eine einseitige Baumreihe stand, als wenn auf der

Kurvenaussenseite ein Feld oder eine Wiese war. Zudem war in der Kurve mit der Baumreihe auch die Geschwindigkeit kleiner als bei der Kurve mit einer Wiese. Wenn auf der Kurvenaussenseite eine einseitige Baumreihe vorhanden war, wurde in Rechtskurven deutlich langsamer gefahren als in Linkskurven (Lippold, Dietze et al. 2006). Dies deutet darauf hin, dass die Fahrer die Baumreihe als optische Führung verwenden. In Linkskurven tritt dieser Effekt stärker auf als in Rechtskurven, wo eher der rechte Fahrbahnrand betrachtet wird als die gegenüberliegende Strassenseite mit der Baumreihe.

Beim Entwurf von Strassen wird darauf geachtet, einen möglichst homogenen Verkehrsfluss mit geringen Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den einzelnen Kurven zu erreichen. Als Grund dafür nennt die SN 640 210⁹ eine Reduktion des Treibstoffverbrauches, der Luftschadstoffe und des Lärms. Weiter ist aber auch die Erwartungshaltung der Lenker von Bedeutung. Auf einer zügig trassierten Strecke mit wenigen, leichten Kurven wird nicht erwartet, dass plötzlich eine scharfe und enge Kurve befahren werden muss.

Neben dem gesamten Strassenraum spielt auch das Erscheinungsbild der Fahrbahnoberfläche eine Rolle. Steyvers liess in einer Studie Probanden acht Strassenmerkmale nach ihrer Wichtigkeit für die Typisierung von Strassen ordnen (Steyvers 1998). Es zeigte sich, dass die Probanden die Strassenbreite und die Oberflächenqualität als wichtigste Aspekte für die Zuordnung der Strassen zu einer Geschwindigkeitsgruppe betrachteten. Interessanterweise hat die Oberflächenqualität subjektiv betrachtet einen sehr hohen Stellenwert, objektiv ist es vor allem die Griffigkeit, die verantwortlich ist für eine genügende Aufnahme der Bremskräfte in Kurven. Subjektiv kann aber diese Griffigkeit von blossen Auge beim Fahren nicht beurteilt werden, da die vorhandene Reibung in erster Linie durch die Mikrotextur erzielt wird¹⁰.

⁹ SN 640 210 Entwurf des Strassenraumes; Vorgehen für die Entwicklung von Gestaltungs- und Betriebskonzepten, VSS Zürich, 1999

¹⁰ SN 640 512-4B Oberflächeneigenschaften von Strassen und Flugplätzen – Prüfverfahren – Teil 4: Verfahren zur Messung der Griffigkeit von Oberflächen: Der Pendeltest, VSS Zürich, 2011

2.4.2. Spurverhalten und Kurvigkeit

Weiter wird das Fahrverhalten stark durch die Kurvigkeit einer Strecke bestimmt (Trapp, Oellers 1974). Als Kurvigkeit bezeichnet man die Summe der absoluten Winkeländerungen auf der Gesamtlänge einer definierten Strecke.

$$\text{Kurvigkeit} \quad ku = \frac{\sum |\tau_i|}{\sum L_i} \quad [\text{gon/km}] \quad (\text{Schlichter 1976})$$

$$\text{Winkeländerungen: Kreisbogen (R):} \quad |\tau_i| = \frac{L_i}{R_i} \cdot 63.7 \quad [\text{gon}]$$

$$\text{Klothoide (A):} \quad |\tau_i| = \frac{L_i}{2R_i} \cdot 63.7 \quad [\text{gon}]$$

$$\text{Kurvigkeit Einzelelement:} \quad ku_i = \frac{|\tau_i|}{L_i} \quad [\text{gon/km}]$$

Die Kurvigkeit beeinflusst die Sichtweiten einer Strecke und damit auch die Fahrgeschwindigkeit. Die Wirkung von Sichtweiten bis 300m kann ungünstig sein, wenn ihr Eindruck der effektiven Kurvigkeit widerspricht, d.h. wenn die Kurvigkeit grösser ist als der Fahrer wahrnimmt (Trapp, Oellers 1974).

Köppel stellte bei einer Befragung fest (Köppel, Bock 1979), dass Fahrzeuglenker ihre Geschwindigkeit auf einer Strecke mit grosser Kurvigkeit (309 gon/km) und einer Fahrbahnbreite von 6m im Mittel um 15.6% überschätzten, auf einer Strecke mit 107gon/km und 6.5m Breite hingegen im Mittel um 6.3% unterschätzten. Auf der Strecke mit der kleinsten Kurvigkeit und grössten Fahrbahnbreite (30gon/km, 7.5m) lagen Schätzungen der Fahrer nur um ca. 2% über der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Kurvigkeit und das damit verbundene Bremsen und Beschleunigen die Wahrnehmung der eigenen Geschwindigkeit beeinflusst. Es ist zu vermuten, dass bei einer grossen Kurvigkeit das subjektive Sicherheitsempfinden kleiner ist und deshalb langsamer gefahren wird. Bei einer mittleren Kurvigkeit könnte der Effekt der engen Kurven zu klein sein, als dass er das Geschwindigkeitsverhalten positiv beeinflusst. In dem Fall könnte das Abbremsen vor der Kurve zur Unterschätzung der gefahrenen Geschwindigkeit führen (Denton 1966).

Köppel (Köppel, Bock 1979) hat aus Geschwindigkeitsmessungen die folgende Regressionsgleichung zur Bestimmung der Fahrgeschwindigkeit V von Einzelfahrzeugen bestimmt:

$$V = 57.49 - 0.0596 KU + 4.293 B + 0.0222 SW + 0.0000258 KU^2$$

Mit KU = Kurvigkeit

B = Fahrbahnbreite

SW = Sichtweite

Köppel verwendet in der obenstehenden Gleichung nur Attribute der Kurve, resp. der Strecke, um die Geschwindigkeiten der Einzelfahrzeuge zu definieren. Wenn nun aber das Geschwindigkeitsniveau in einer Kurve sehr inhomogen ist, müssten noch weitere Einflussfaktoren zur Erklärung der gefahrenen Geschwindigkeiten beigezogen werden oder es ist zu vermuten, dass die Kurve und die Streckencharakteristik alleine nicht genügen, um die gefahrenen Geschwindigkeiten zu begründen. Möglicherweise haben die Kurvigkeit und die Fahrbahnbreite einen Einfluss auf das Spurverhalten und dieses wiederum auf die Geschwindigkeit.

2.4.3. Spurverhalten und Markierung

Jeder Fahrer hat eine individuelle Tendenz, eher rechts oder links zu fahren, dieses Fahrverhalten ist über eine Strecke hinweg konstant (Leutzbach, Maier et al. 1981).

Bei freier Fahrweise streben die Fahrer einen geschwindigkeitsabhängigen Mindestabstand zum rechten Fahrbahnrand an (Brilon, Döhler 1978). Leutzbach bezeichnet den rechten Fahrbahnrand als „stärkstes optisches Hindernis“ für den Fahrzeuglenker, der seinen seitlichen Abstand zum Fahrbahnrand je nach Geschwindigkeit und persönlichem Sicherheitsbedürfnis wählt (Leutzbach, Maier et al. 1981).

Coutton-Jean untersuchte 90°-Kurven mit einem Fahrstreifen sowie ohne Mittellinie und fand heraus, dass die Fahrer im Annäherungsbereich der Kurve eine Position am äusseren Fahrbahnrand einnahmen, die Fahrbahnmitte am Kurveneingang querten und dann ab dem Kurveneingang eine Verkleinerung des seitlichen Abstandes zur inneren Randlinie hin anstrebten.

Dieser Abstand wurde zwischen 20° und 70° der Kurve beibehalten (Coutton-Jean, Mestre et al. 2009). Der seitliche Abstand zur inneren Randlinie ist eine Funktion des Krümmungsradius. Je grösser der Krümmungsradius, desto grössere Abstände ergaben sich (Coutton-Jean, Mestre et al. 2009). Das gleiche Muster fand auch Volkenhoff (Volkenhoff, Lank et al. 2009). 20% aller untersuchten Fahrer holten vor der Kurve bis auf die Gegenfahrbahn aus, 65% näherten sich stark der Mittellinie, ohne diese jedoch zu überfahren. Es ist anzunehmen, dass das Ausholen dazu dient, näher an den Kurvenscheitelpunkt fahren zu können, d.h. näher am inneren Rand und so die Kurve durch den grösseren Radius schneller durchfahren zu können.

Auf Strassen ohne Markierung nahmen die Fahrer eine zentralere Position ein als auf Strassen mit Markierungen (de Waard, Steyvers et al. 2004), ebenso verhielten sie sich auf Strassen mit Randlinien gegenüber Strassen mit Mittellinien (Steyvers, De Waard 2000). Der grösste visuelle Unterschied beim Befahren einer Strasse bestand zwischen einer unmarkierten Strasse und einer Strasse mit einer Mittelmarkierung (de Waard, Steyvers et al. 2004).

Beim Spurverhalten zeigt sich daher eine kleinere Streuung der Fahrspuren bei Strassen mit Mittellinien im Gegensatz zu Strassen nur mit Randlinien (Weise, Steyer 1999; Steyvers, De Waard 2000). Eine noch grössere Spurtreue entsteht, wenn eine Kurve sowohl eine Rand- als auch eine Mittellinie hat (Lindenmann 1981).

Bei Gegenverkehr fahren Fahrzeuglenker bei freier Fahrt, d.h. mit einem zeitlichen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug von mehr als 4 Sekunden, im Mittel um ca. 12-15cm näher am Fahrbahnrand als bei freier Fahrt ohne Gegenverkehr (Lenz, Burger 1975; Leutzbach, Maier et al. 1981). Die Fahrzeuglenker reduzieren den Sicherheitsabstand zum Fahrbahnrand, den sie ohne Gegenverkehr einhalten würden, zugunsten eines grösseren seitlichen Abstandes zum entgegenkommenden Fahrzeug.

Coutton-Jean schreibt in einer Studie (Coutton-Jean, Mestre et al. 2009), dass Fahrer ihr Steuerverhalten in Kurven nicht unter Berücksichtigung der Fahrbahnmitte regulieren, sondern wohl eher versuchen würden, die Änderungen des seitlichen Abstandes zur inneren Randlinie zu minimieren.

Auch Knoflacher schreibt, dass sich Fahrzeuglenker eher an Rand- als an Mittellinien orientieren würden (Knoflacher 1976).

Je grösser der seitliche Abstand des Fahrzeuges zu einer Rand- oder Mittellinie ist, desto grösser wird die Unempfindlichkeit auf Abweichungen von der gewünschten Fahrlinie (Knoflacher 1976).

Bei Dunkelheit nimmt der seitliche Abstand im Allgemeinen zu, sowohl bei unmarkierter Fahrbahn als auch bei einer zusätzlichen Mittelmarkierung (Knoflacher 1976). Wird die Strasse mit einer Randlinie markiert, so verschwindet der Einfluss der Dunkelheit auf den seitlichen Abstand nahezu weitgehend (Knoflacher 1976). Steyvers fand heraus, dass die Lenkradaktionen in der Dunkelheit exakter waren als am Tag. Randlinien helfen dem Fahrer, seine Spurposition exakter zu halten und darum kleinere Lenkradaktionen auszuführen (Steyvers, De Waard 2000).

Fahrer schätzen eine Strecke mit mehr als einem Gestaltungselement (Randlinie und Mittellinie, Randlinie und Mittellinie und Leitplanke) erheblich sicherer ein als mit nur einem Gestaltungselement (Rudinger, Holte 1994). Sie unterscheiden auch Links- und Rechtskurven mit Randlinien bezüglich ihrer Gefährlichkeit. So erscheint den Testpersonen die Rechtskurve gefährlicher, wird hingegen noch zusätzlich eine Mittellinie angebracht, empfinden sie die Linkskurve gefährlicher (Rudinger, Holte 1994).

Randlinien können, bedingt durch die bessere optische Führung und das gesteigerte subjektive Sicherheitsgefühl, helfen, die Anzahl der Unfälle zu reduzieren, ermöglichen dem Lenker gerade deshalb aber auch, die Kurve mit einer höheren Geschwindigkeit zu durchfahren (Coutton-Jean, Mestre et al. 2009; Volkenhoff, Lank et al. 2009).

Steyvers (Steyvers, De Waard 2000) und auch Van Driel (Van Driel, Davidse et al. 2004) zeigten in ihren Studien, dass das Hinzufügen einer Randlinie auf einer unmarkierten Strasse zu höheren Geschwindigkeiten führte. Eine weitere visuelle Hilfestellung für den Fahrer in Form einer Mittellinie führte bei Steyvers (Steyvers, De Waard 2000) zu noch höheren Geschwindigkeiten. Van Driel betrachtete zusätzlich zur Randlinie schmale Bankette und stellte eine Zunahme der Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den einzelnen Fahrern fest. Im Zusammenhang mit dem

Unfallgeschehen vermutete sie, dass die seitliche Position bezogen auf die Randlinie sicherheitsrelevanter waren als die Position verbunden mit der Mittellinie (Van Driel, Davidse et al. 2004). Dennoch konnte laut Leutzbach keine Abhängigkeit zwischen Geschwindigkeit und Abstandsverhalten zu einer Leitlinie erkannt werden, hingegen sank die Spurstabilität mit zunehmender Geschwindigkeit etwas (Leutzbach, Maier et al. 1981). Die Fahrer korrigierten ihre Spur bei einer Geschwindigkeit von 80-100 km/h bereits bei einer Abweichung von 15-25cm von der Ideallinie (Knoflacher 1976).

Das Anbringen von Markierungen kann dem Fahrer helfen, sein Fahrverhalten den vorhandenen Randbedingungen anzupassen, sofern er die Strecke durch die veränderte Markierung als unsicherer und damit auch gefährlicher interpretiert (Rudinger, Holte 1994).

Andere Studien gehen von einer allgemeinen Geschwindigkeitsreduktion durch Fahrbahnmarkierungen (Charlton 2007) oder einer Reduktion in bestimmten Fällen, wie z.B. durch Mittellinien in Rechtskurven oder Fahrbahnbreiten unter 3m (Godley, Triggs et al. 2004) oder Kurvenleitpfeilen, aus (Charlton 2007).

Weise und Steyer verwerfen die Hypothese, dass eine Mittelmarkierung zu einer höheren Geschwindigkeit führen würde (Weise, Steyer 1999) und Van Driel fand in einer Meta-Analyse von 65 Experimenten heraus, dass das Anbringen einer Randlinie die Geschwindigkeit sowohl erhöhen als auch senken und die seitliche Position 30cm gegen die Strassenmitte und 35cm gegen den Rand verschieben kann (Van Driel, Davidse et al. 2004).

2.5. Spurverhalten und Verkehrsablauf

2.5.1. Spurverhalten und Geschwindigkeit

Die gewählte Geschwindigkeit eines Fahrers ist von seinen Charaktereigenschaften, seiner Motivation und emotionalen Einstellung abhängig (Friedinger 1982; Cooper 1997). Neben diesen persönlichen Merkmalen zeigt sich auch, dass Fahrer ihre eigene Geschwindigkeit in Bezug zur Geschwindigkeit anderer Fahrer häufig falsch einschätzen. Mannering zitiert Walton und Bathurst, die 1998 herausgefunden haben, dass

mehr als 85% der Fahrer angaben, langsamer als der Durchschnitt zu fahren (Mannering 2009). Haglund und Aberg (Haglund, Aberg 2000) zeigten, dass Fahrer schätzten, dass mehr als die Hälfte der anderen Fahrer die Geschwindigkeitslimite um mehr als 10 km/h überschritten, obwohl effektiv nur rund ein Viertel so schnell unterwegs war. In einer anderen Studie zeigte sich, dass Fahrer, welche nicht alleine unterwegs waren oder Fahrer mit mehr als 11 Jahren Fahrpraxis und solche, die zwischen 31 und 50 Jahre alt waren, ihre Geschwindigkeit signifikant unterschätzten (Milosevic, Milic 1990). Ein weiterer Faktor für eine Unterschätzung der eigenen Geschwindigkeit ist das Abbremsen. Denton (Denton 1966) fand heraus, dass Fahrer ihre Geschwindigkeit unterschätzten, nachdem sie abgebremst hatten und Milosevic und Milic nahmen an, dass Lenker, die vor Kurven häufig bremsen, ihre Geschwindigkeit in Kurven mit grosser Wahrscheinlichkeit unterschätzen (Milosevic, Milic 1990).

Neben den Fahrern, die ihre Geschwindigkeit falsch einschätzen, kategorisiert Steyvers drei Typen von „Rasern“: diejenigen, die nicht wissen, dass sie zu schnell unterwegs sind, weil sie die Tempolimite nicht kennen, solche die sich von anderen Verkehrsteilnehmern beeinflussen lassen und so fahren wollen wie alle andern auch und die dritte Gruppe derer, die absichtlich zu schnell fahren, weil sie es so wollen (Steyvers 1999).

Betrachtet man die Geschwindigkeitswahl in der Kurve, so führt eine bessere und frühzeitigere Wahrnehmung der Kurve tendenziell zu einem höheren und stetigeren Geschwindigkeitsniveau (Landwehr 1991; Weise, Steyer 1999; Steyer 2004). Obwohl unfallträchtigere Kurven näher, sichtbarer und breiter als unfallfreie Kurven scheinen, zeigen sich gemäss Shinar (Shinar 1977) keine Unterschiede im Geschwindigkeitsverhalten zwischen unfallträchtigen Kurven und Kurven ohne Unfälle. In beiden Kurventypen bremsen die Fahrer auch nach dem Kurvenanfang weiter, ein Zeichen dafür, dass die Einfahrt in die Kurve mit zu hoher Geschwindigkeit erfolgte. In seiner Studie gab Kanellaidis als wichtigste Faktoren für die Geschwindigkeitswahl Sichtweite, Fahrbahnzustand, scharfe Krümmung und zusätzliche Warnsignale an (Kanellaidis 1995), aber nur die wahrgenommene Kurvenschärfe verleitete in erster Linie zum Bremsen (Shinar 1977).

2.5.2. Spurverhalten in Bezug auf andere Verkehrsteilnehmer

Um nur von anderen Verkehrsteilnehmern unbeeinflusste Spuren zu analysieren, werden in der vorliegenden Arbeit lediglich die Spuren von Fahrvorgängen ohne direkt vorausfahrende Fahrzeuge betrachtet, d.h. mit einer Zeitlücke von mindestens vier Sekunden zum vorausfahrenden Fahrzeug. Brilon (Brilon, Döhler 1978) fand heraus, dass Fahrzeuge, die einem anderen Fahrzeug folgten, im Mittel 10 bis 25cm weiter links fuhren als bei einer unbeeinflussten Fahrt. Bei einer Fahrt mit Gegenverkehr wurde dagegen weiter rechts gefahren als bei einer unbeeinflussten Fahrt (Brilon, Döhler 1978).

Es ist anzunehmen, dass die Spurhaltung durch andere Fahrzeuge erleichtert wird (Brilon, Döhler 1978) und Faktoren der Spurwahl wie der seitliche Abstand zum Kurvenrand oder die Wahl der Geschwindigkeit stärker von anderen Verkehrsteilnehmern beeinflusst wird als durch die Wahrnehmung der Kurve im unbeeinflussten Verkehrsablauf.

2.6. Folgerungen aus Kapitel 2

Durch die vorliegende Literaturlauswertung alleine konnte noch keine schlüssige Antwort auf die Frage, ob die Unfallwahrscheinlichkeit in einer Kurve anhand der Struktur des Spurverhaltens abgeschätzt werden kann, gefunden werden. Dennoch ergaben sich einige Hinweise darauf, dass die Ausgestaltung einer Kurve und das sich daraus ergebende Fahrverhalten einen gewissen Zusammenhang haben.

Ergeben sich signifikant unterschiedliche Spurtypenhäufigkeiten in unterschiedlichen Kurven? Welche geometrischen Elemente einer Kurve sind massgebende Faktoren für ein bestimmtes Spurverhalten?

Es ist anzunehmen, dass in Kurven mit Rand- und Mittellinien, welche eine besserer Erkennbarkeit des Kurvenverlaufes und damit ein sichereres Fahrgefühl vermitteln, eher die Spurtypen „Ideal- oder Normalspur“ und weniger die Spurtypen „Korrigieren“ oder „Hinaustragen“ auftreten werden. Die verbesserte Erkennbarkeit könnte aber auch zu höheren gefahrenen Geschwindigkeiten führen, was wiederum den Spurtyp „Schneiden“ und „Ausholen“ begünstigen würde.

Kann ein Einfluss des gesamten Strassenraumes, d.h. Strasse und ihre unmittelbare Umgebung, auf die Spurverteilung in einer Kurve erkannt werden?

Es zeigte sich, dass der Randbereich der Fahrbahn nahe vor dem Fahrzeug dem Lenker hilft, seine Spurposition zu bestimmen. Ein schlecht erkennbarer Fahrbahnrand könnte also dazu beitragen, dass in einer Kurve eher Spurtypen wie „Hinaustragen“ oder „Korrigieren“ zu erwarten sind. Eine Strecke mit einer Kurvigkeit von ungefähr 100 gon/km, d. h. eine eher zügig trassierte Strecke, kann zur Unterschätzung der gefahrenen Geschwindigkeit führen. Taucht auf einer solchen Strecke unmittelbar eine Kurve mit grosser Krümmung auf, kann erwartet werden, dass zum Ersten häufiger Spurtypen auftreten, bei denen der Lenker eine Korrektur der gefahrenen Linie vornehmen muss und zum Zweiten, bedingt durch die höhere Geschwindigkeit, die Kurve geschnitten wird.

Kann ein Einfluss einer Strecke mit mehreren Kurven auf die Spurverteilung einer einzelnen Kurve dieser Strecke abgeleitet werden? Welche Zusammenhänge können zwischen dem Geschwindigkeitsniveau einer Kurve und dem Spurverhalten abgeleitet werden?

Bei den gefahrenen Geschwindigkeiten im Annäherungsbereich einer Kurve spielen sowohl das absolute Niveau der Geschwindigkeiten als auch deren Homogenität eine Rolle. Herrscht generell ein eher hohes Geschwindigkeitsniveau vor und bremsen die Fahrzeuglenker vor der Kurve zudem stark ab, könnte daraus gefolgert werden, dass die Kurve schlecht erkennbar ist, durch das Bremsen die Geschwindigkeit unterschätzt wird und die Spurtypen „Korrigieren“, „Hinaustragen“ oder „Schneiden“ häufig auftreten würden. Je grösser die Geschwindigkeitsdifferenzen der einzelnen Fahrer sind, desto eher kann angenommen werden, dass die Wahrnehmbarkeit einer Kurve ungünstig ist.

In der Literatur werden verschiedene Aspekte des Fahrverhaltens beschrieben und Ursachen für bestimmte Handlungen der Fahrer angegeben. Was allerdings fehlt, sind Beschreibungen des Spurverhaltens und konkrete Zusammenhänge zwischen Spurverhalten und Unfallgeschehen in Kurven.

Welche Zusammenhänge bestehen zwischen dem Unfallgeschehen einer Kurve und der Struktur der Spurverteilung?

Generell konnte durch die Literaturrecherche festgestellt werden, dass unterschiedliche geometrische Kurveneigenschaften zu unterschiedlichen Fahrverhalten geführt haben und auch das Unfallgeschehen nicht in allen Kurven gleich ist. Daraus lässt sich schliessen, dass ein potentieller Zusammenhang zwischen Spurverhalten und Unfallgeschehen vorhanden sein könnte. In welcher Art und Weise dieser Zusammenhang besteht und welche Faktoren die wichtigste Rolle spielen, soll im Verlauf dieser Arbeit geklärt werden.

Die folgende Tabelle (Tab. 2-1) zeigt erste Erkenntnisse aus der Literaturauswertung.

Tabelle 2-1: erste Erkenntnisse aus Literaturlauswertung

Faktor	Erkenntnis
Geometrische Kurvenelemente	Rand- und Mittellinien verbessern die Erkennbarkeit einer Kurve, ein schlecht erkennbarer Fahrbahnrand könnte zu Spurtypen „Hinaustragen“ oder „Korrigieren“ führen.
Kurvigkeit	Zügig trassierte Strecke mit einer einzelnen Kurve könnte zum Spurtyp „Schneiden“ und „Ausholen“ führen.
Inhomogenes Geschwindigkeitsniveau	Verstärktes Abbremsen und in der Folge Unterschätzung der Geschwindigkeit könnte in den Spurtypen „Korrigieren“, „Hinaustragen“ oder „Schneiden“ resultieren.
Sichtweiten	Sichtbehinderung im Bereich der Kurveninnenseite wirkt dem Spurtyp „Schneiden“ entgegen.

3. Hypothesen

3.1. Herleitung der Hypothesen

Aus der Literaturrecherche und der weiteren, aus eigenen Überlegungen entstandenen Systemanalyse, lässt sich die Annahme treffen, dass das Spurverhalten und das Unfallgeschehen in einer Kurve in einem Zusammenhang stehen. Diese Annahme ist in den folgenden Kapiteln 3.2 bis 3.6 detaillierter ausformuliert und führt zu den einzelnen Hypothesen, auf die in der vorliegenden Arbeit Antworten gefunden werden sollen. Am Schluss dienen die gefundenen Resultate dazu, die zentrale Frage zu beantworten, ob die Unfallwahrscheinlichkeit einer Kurve anhand der Struktur des Spurverhaltens abgeschätzt werden kann, und wenn dies möglich ist, wie die entsprechende Verteilung der Spurtypen aussieht.

3.2. Spurverhalten in unterschiedlichen Kurven

Ergeben sich signifikant unterschiedliche Spurtypenhäufigkeiten in unterschiedlichen Kurven?

Nicht in allen Kurven treten die gleichen Unfallhäufigkeiten auf. Ausgehend von der Annahme, dass zwischen Spurverhalten und Unfallgeschehen ein Zusammenhang besteht, lässt sich vermuten, dass es Kurvenmerkmale gibt, die das Fahrverhalten und damit auch das Unfallgeschehen stärker beeinflussen als andere.

→ *Kurven mit unterschiedlichen geometrischen Eigenschaften weisen Spurtypenverteilungen auf, welche sich signifikant voneinander unterscheiden.*

→ *Es gibt Elemente einer Kurve, die das Spurverhalten massgeblich beeinflussen. Es sind dies hauptsächlich Radius, Fahrbahnbreite, Markierungen (Rand- und/oder Mittellinien) und die Grösse der Richtungsänderung.*

3.3. Spurverhalten und Strassenraum

Kann ein Einfluss des gesamten Strassenraumes, d.h. Strasse und ihre unmittelbare Umgebung, auf die Spurverteilung in einer Kurve erkannt werden?

Kann ein Einfluss einer Strecke mit mehreren Kurven auf die Spurverteilung einer einzelnen Kurve dieser Strecke abgeleitet werden?

Die optische Wahrnehmung des Strassenraumes wirkt sich auf die Verhaltensweise eines Fahrers aus. Wenn ein Fahrer auf der vorangegangenen Strecke bereits Kurven durchfahren hat, zeigt er keine resp. weniger Mühe mit folgenden, engeren Kurven. Besteht die Strecke aber eher aus gestreckten Abschnitten und kann aufgrund der Trassierung nicht direkt auf kommende Kurven und deren geometrische Eigenschaften geschlossen werden, so hat der Lenker mehr Probleme, die richtige Geschwindigkeit und Spurwahl zu treffen.

→ *Das Spurverhalten in einer Kurve entlang einer inhomogenen Strecke unterscheidet sich vom Spurverhalten in einer Kurve entlang einer homogen trassierten Strecke.*

3.4. Spurverhalten und Kurvenelemente

Welche geometrischen Elemente einer Kurve sind massgebende Faktoren für ein bestimmtes Spurverhalten?

Tendenziell versucht ein Lenker, seinem Sicherheitsbedürfnis bei einer bestimmten Geschwindigkeit gerecht zu werden, indem er einen möglichst konstanten Abstand zum rechten Fahrbahnrand hält. Das Lenkverhalten wird weniger in Bezug zur Mittellinie gesteuert.

→ *Das Spurverhalten einer Kurve mit Mittel-, aber ohne Randlinie unterscheidet sich signifikant von demjenigen einer Kurve mit Rand- und Mittellinien.*

Die Randmarkierungen in Kurven ermöglichen es durch die periphere Wahrnehmung, die aktuelle Spurposition und die Geschwindigkeit abzuschätzen. Fehlen diese Markierungen, so muss der Lenker den Strassenrand vermehrt mit zentralen Fixationen und folglich mehr Sakkaden betrachten. Dies führt zu schlechteren Spurpositionen und damit zu einer ungünstigen Spurverteilung.

→ *Fehlende Randmarkierungen führen zu einer bezüglich Sicherheit ungünstigen Spurverteilung.*

In Kurven mit Randmarkierungen kann durch die bessere optische Führung schneller gefahren werden als bei fehlenden Markierungen. Durch die höhere Geschwindigkeit konzentriert sich der Blick des Fahrers auf ein zentraleres Blickfeld, die peripheren Bereiche werden schlechter wahrgenommen und durch fehlende Geschwindigkeitsabschätzung im seitlichen Blickfeld wird die Geschwindigkeit eher unterschätzt. Dadurch kommt es vermehrt zu unangepassten Spurtypen wie „Schneiden“, „Ausholen“ oder „Hinaustragen“.

→ *In Kurven mit Randmarkierungen und höheren Geschwindigkeiten sind vermehrt die Spurtypen „Schneiden“, „Ausholen“ oder „Hinaustragen“ zu finden.*

3.5. Spurverhalten bei unterschiedlichen Geschwindigkeitsniveaus

Welche Zusammenhänge können zwischen dem Geschwindigkeitsniveau einer Kurve und dem Spurverhalten abgeleitet werden?

Schleuder- und Selbstunfälle entstehen häufig durch fehlende oder nicht korrekt aufgenommene Informationen des Strassenraumes und den daraus entstehenden unangemessenen Geschwindigkeiten im Annäherungsbereich und/oder Spurverhalten in der Kurve. Fahrer müssen vor einer Kurve verstärkt bremsen, was einerseits zur Unterschätzung der Geschwindigkeit und andererseits zu grösseren Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Annäherungs- und Kurvenbereich führt.

→ *Grosse Geschwindigkeitsdifferenzen im Anfahrt- und im Kurvenscheitelbereich sind ein Indiz für schlechte oder späte Erkennbarkeit einer Kurve.*

→ *Kurven mit einer inhomogenen Geschwindigkeitsverteilung weisen eine andere Spurtypenverteilung und eine höhere Unfallwahrscheinlichkeit auf als Kurven mit homogenen Geschwindigkeiten.*

3.6. Spurverhalten und Unfallgeschehen

Welche Zusammenhänge bestehen zwischen dem Unfallgeschehen einer Kurve und der Struktur der Spurverteilung?

Ein Fahrzeuglenker verarbeitet seine visuellen Informationen fortlaufend und wandelt sie kontinuierlich in Lenk- und Gaspedalbewegungen um. Dadurch und durch das Bestreben, Querkräfte konstant und vor allem unterhalb seiner Komfortgrenze zu halten, erfolgt ein Spurverhalten ohne grössere, plötzliche Lenkkorrekturen.

→ *Es gibt Elemente einer Kurve, die sowohl das Auftreten bestimmter Unfalltypen als auch das Vorhandensein bestimmter Spurtypen signifikant beeinflussen.*

4. Methodik

4.1. Einleitung

Das folgende Kapitel „Methodik“ zeigt auf, welche Analysen und Untersuchungsgrößen für die Überprüfung der Hypothesen zum Spurverhalten in Kurven benötigt und mit welchen Methoden sie erarbeitet oder erfasst werden. Zudem soll es erklären, wie die einzelnen Größen im Zusammenhang stehen und welche Schlüsse daraus gezogen werden können.

4.2. Literaturrecherchen

In der Literaturrecherche (siehe Kapitel 2) wurden Erkenntnisse zum Spurverhalten einerseits im Bereich der Verkehrstechnik und andererseits auf dem Gebiet der Verkehrs- und Wahrnehmungspsychologie untersucht.

Bisher liegen in den einzelnen Fachgebieten viele Einzelstudien vor, aber es fehlt eine übergreifende Methodik, die die Themengebiete der Verkehrstechnik, des Unfallgeschehens und der Wahrnehmungspsychologie im Bereich des Spurverhaltens kombiniert betrachtet.

4.3. Fehlerbaumanalyse

4.3.1. Anforderungen

Da Unfälle nicht in Echtzeit erfasst oder vorsätzlich herbeigeführt werden können, wird in der vorliegenden Arbeit auf die Methode der Fehlerbaumanalyse¹¹ zurückgegriffen.

Shinar geht davon aus, dass die Ursachen für einen Fastunfall dieselben sind wie für einen Unfall (Shinar 1984). Deshalb soll hier die Methode der

¹¹ DIN EN 61025:2007-08 Fehlzustandsbaumanalyse

Fehlerbaumanalyse¹² helfen, die möglichen Ursachen, welche zu einem Unfall oder Fastunfall führen, systematisch zu identifizieren und logisch miteinander zu verknüpfen. Sie ist eine Top-Down-Methode, bei der von einem unerwünschten Ereignis, hier ein Unfall oder Fastunfall, alle möglichen Einflussfaktoren nach einer Art Baumstruktur erfasst werden.

In einem ersten Schritt wird das System, welches untersucht werden soll, in möglichst detaillierte Teilsysteme zerlegt. Im vorliegenden Fall wird das Gesamtsystem Fahrer-Fahrzeug-Infrastruktur in die entsprechenden Teilsysteme unterteilt. Je kleiner die einzelnen Elemente der Teilsysteme sind, desto besser lassen sich im Anschluss die Ausfallkriterien, welche zu einem unerwünschten Ereignis führen, bestimmen. Es handelt sich dabei nicht nur um den eigentlichen Unfall, sondern auch um Fastunfälle, denen ein Fehlverhalten zugrunde liegt, die aber in der Folge nicht mit einem Sach- oder Personenschaden enden. Von dieser Gleichbehandlung der Unfälle und der Fastunfälle geht auch das Verfahren der „Traffic Conflict Technique“ aus. Dieses Verfahren bewertet Beinaheunfälle objektiv und/oder subjektiv und basiert auf der Annahme, dass die Ursachen für Unfälle und Fastunfälle dieselben sind (Shinar 1984).

Nach der Bestimmung der möglichen Ausfallarten der einzelnen Elemente der Komponenten des Gesamtsystems kann der Fehlerbaum erstellt werden.

4.3.2. Mögliche Methoden und Bestimmung der bestgeeignetsten Methode

Als Alternativen zur Fehlerbaumanalyse sind in der folgenden Tabelle (Tab. 4-1) einige Methoden erwähnt, die ebenfalls zur Systemanalyse verwendet werden können. Im Folgenden wird auf die einzelnen Methoden kurz eingegangen und erläutert, weshalb sie hier nicht zur Anwendung gelangen.

¹² DIN EN 61025:2007-08 Fehlzustandsbaumanalyse

Tabelle 4-1: Weitere mögliche Methoden zur Systemanalyse

Methode	Inhalt
Mind-Map ¹⁾	Graphische Ideenfindung, teilweise unstrukturiert
Ursache-Wirkungsdiagramm ²⁾	Stellt Zusammenhänge von Ursachen und Wirkungen graphisch dar
Ishikawa (einfaches Fischgrätendiagramm) ³⁾	Stellt Zusammenhänge von Ursachen und Wirkungen graphisch dar, vorgegebene Struktur
Intensitäts-Beziehungsmatrix ⁴⁾	Geschätzte Wirk-Zusammenhänge

Quellen:

- 1) (Buzan, Buzan 2002)
- 2) (Schmidt 2009)
- 3) (Kern 2009)
- 4) (Gundlach 2004)

Die Methode des Mind-Mapping wurde hier ausgeschlossen, da sie unstrukturiert vorgeht und nicht zwingend Abhängigkeiten dargestellt werden müssen. Das Ursache-Wirkungsdiagramm stellt Ursachen, die zu einem Ereignis führen, dar. Eine spezielle Form des Ursachen-Wirkungsdiagramms ist das Ishikawa- oder Fischgrätendiagramm. Es hat eine vorgegebene Struktur und es werden systematisch alle Ursachen und ihre Wirkungen erfasst. Im Gegensatz zur Fehlerbaumanalyse werden Ursachen definiert und anhand derer wird dann ein Problem erfasst, das aus diesen Ursachen resultieren könnte. Es werden aber keine Wechselwirkungen oder zeitlichen Abhängigkeiten erfasst. Diese Methode wurde hier nicht gewählt, weil die Schwierigkeit darin bestanden hätte, von Anfang an alle Ursachen resp. Einflussfaktoren für einen Unfall zu bestimmen. Das gleiche gilt auch für das Ishikawa-Diagramm. Bei einer Intensitäts-Beziehungsmatrix wird in einer zweidimensionalen Matrix die Wirkung von sogenannten Stellgrößen aufeinander abgeschätzt. So kann auch die Anzahl der für spätere Untersuchungen verwendeten Faktoren reduziert werden.

Diese Methode war für die Analyse der Einflussgrößen im Zusammenhang mit den Unfalltypen nicht geeignet, da bereits zu Beginn der Untersuchung

definiert werden muss, welche Faktoren welchen Einfluss auf andere Faktoren haben, resp. welche Faktoren überhaupt beachtet werden müssen.

4.3.3. Anwendung

Die Durchführung einer Fehlerbaumanalyse nach DIN EN 61025 geschieht im Allgemeinen nach den folgenden Schritten:

1. Systemanalyse
2. Bestimmung des unerwünschten Ereignisses und der Ausfallkriterien
3. Festlegung der relevanten Zuverlässigkeitskenngrößen und des Zeitintervalls
4. Bestimmung der Ausfallarten der Komponenten
5. Aufstellung des Fehlerbaums
6. Bewerten der Einträge des Fehlerbaumes mit Ausfallzeiten, Ausfallraten, etc.
7. Auswertung des Fehlerbaums
8. Bewertung der Ergebnisse

Da die Fehlerbaumanalyse vor allem für das Versagen von technischen Systemen und der Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls verwendet wird, kann sie im vorliegenden Fall auf das System „Fahrer-Fahrzeug-Infrastruktur“ nur eingeschränkt angewendet werden. Hier können keine Wahrscheinlichkeiten angegeben, sondern nur die einzelnen Ursachen möglichst detailliert beschrieben werden. Eine Ausfallwahrscheinlichkeit, im Sinne der Fehlerbaumanalyse, zu beschreiben oder zu berechnen, ist nur möglich, wenn dazu Zahlen aus Messungen oder Erfahrungswerte vorliegen. Dennoch erscheint die Methode gut geeignet, eine Systematisierung der Ursache-Wirkungs-Mechanismen der analysierten Unfalltypen zu erarbeiten.

4.4. Empirische Datenerhebung

4.4.1. Unfallgeschehen

Um eine Unfallwahrscheinlichkeit aufgrund des Spurverhaltens von Motorfahrzeugen in Kurven zu bestimmen, werden Daten aus den Unfallstatistiken der Kantone Aargau und Zürich sowie der Stadt Zürich verwendet. Trotz teilweise vorhandener Unfallprotokolle mit dem jeweiligen Unfallhergang lässt sich der ursprüngliche Grund für das Fehlverhalten, welches zum Unfall geführt hat, nicht vollständig bestimmen.

Die Daten von Stadt und Kanton Zürich sind Unfalldaten, welche aus bereits in früheren Forschungsarbeiten gemessenen Kurven stammen. Diese Kurven wurden nicht speziell nach Unfallschwerpunkten ausgesucht und sollen das Spurverhalten aufzeigen, das in sicheren und bezüglich Unfallhäufigkeit unauffälligen Kurven auftritt.

Die Daten aus dem Kanton Aargau wurden mittels einer Unfalldatenbank (Unfall-DB von PTV Group¹³), wie sie der Kanton verwendet, ausgesucht. Die Auswahl der Kurven erfolgte durch die Selektion der kurvenrelevanten Unfalltypen und der visuellen Bestimmung der Unfallschwerpunkte auf einer graphischen Oberfläche des Programms. Die Schwierigkeit bestand darin, Kurven mit einer genügenden Anzahl von Unfällen während der Erfassungsperiode zu finden. Als weitere Anforderung zur Auswertung der Spurtypen mussten die Kurven ausserorts und möglichst in einer horizontalen Ebene liegen, d.h. eine möglichst kleine Längsneigung aufweisen.

Die vorhandenen Angaben zu den einzelnen Unfällen eignen sich zur Auswertung der Unfalldaten nach SN 640 008¹⁴. Es wird überprüft, ob sich die Verteilung der Unfalltypen in verschiedenen Kurven sowie die Unfallzahlen in verschiedenen Jahren in einzelnen Kurven signifikant unterscheiden. Auf eine klassische verkehrstechnische Unfallanalyse VUA¹⁵, wie sie in der Praxis gemacht wird (vgl. 6.2.4), wird in dieser Forschungsarbeit

¹³ PTV Group ist ein Software- und Consulting-Unternehmen im Bereich Verkehr, Transportlogistik und Geomarketing.

¹⁴ SN 640 008, Strassenverkehrsunfälle; Analyse von Unfallzahlen, Unfallstatistiken, Vergleiche und Entwicklungen, VSS Zürich, 2000

¹⁵ SN 640 010, Strassenverkehrsunfälle; Unfallanalysen sowie Kurz-, Gefahren- und Risikoanalysen, VSS Zürich, 2001

bewusst verzichtet. In dieser Analyse werden einerseits die quantifizierten Mängel (Anlagemängel, Fehlverhalten) aus einem Vergleich mit den Sollwerten der technischen Normen und Rechtsnormen erfasst. Auf der anderen Seite werden, im Sinne von Fehlerhypothesen, die möglichen Mängel eruiert. Diese beiden Gruppen werden einander gegenübergestellt und daraus die massgebenden Mängel und die Unfallursachen abgeleitet. Die VUA betrachtet das Spurverhalten zum einen nicht so, wie es in der vorliegenden Arbeit erfasst wurde, da die Möglichkeit einer Messung ohne die Messpfosten des IVT's (vgl. 4.4.3) nicht machbar ist. Zum anderen sollen nicht nur Mängel in die Analyse einfließen, sondern es sollen Einflussfaktoren der Kurve gefunden werden, die das Spurverhalten und damit auch das Unfallgeschehen beeinflussen.

Der hier bewusst verwendete, neue Ansatz der Messung der Spurverläufe lässt sich vielleicht später in einer geeigneten Form in die heutige VUA integrieren.

4.4.2. Auswahl der Messstrecken

Aus einem früheren Forschungsauftrag des IVT (Belopitov, Spacek 1999) konnten Messdaten übernommen werden. Damals wurden die Geschwindigkeiten in Kurven untersucht, das Spurverhalten wurde aber nicht speziell ausgewertet. Diese Kurven waren allesamt nicht speziell als Unfallschwerpunkte ausgewiesen worden. Vier dieser Kurven wurden nochmals gemessen, um festzustellen, ob sich das Spurverhalten in den letzten Jahren verändert hat oder ob die früher erhobenen Messdaten auch bei den heutigen Verkehrsverhältnissen noch ihre Gültigkeit haben. Es soll überprüft werden, ob sich die betrachteten Einflussfaktoren langfristig stabil verhalten.

Die neuen Messstrecken wurden anhand des vorher untersuchten Unfallgeschehens ausgewählt. Es sollten sich in den betreffenden Kurven möglichst viele Selbst- und Schleuderunfälle ereignet haben. Weiter sollten in Etwa gleich viele Links- wie Rechtskurven gemessen werden. Ebenfalls wurden Kurven mit unterschiedlichen Radien, Richtungsänderungen und Verkehrsaufkommen ausgewählt.

Die Informationen zu den geometrischen Elementen der einzelnen Kurven stammen vom Kanton Aargau aus Plänen in Papierform, aus dem kantonalen GIS und aus Messungen vor Ort.

4.4.3. Messsystem

Für die Erfassung des Spurverhaltens in Kurven wurde ein Messsystem verwendet, welches im Rahmen eines früheren Forschungsauftrages (Scheifele, Spacek 1992) entwickelt wurde. Es besteht aus 12 unabhängig voneinander verwendbaren Kurvenleitpfosten, welche je mit einem Ultraschall-Distanzmesser und zwei Infrarotsensoren ausgerüstet sind. Ihr Gehäuse besteht aus handelsüblichen Leitpfosten, wie sie in Kurven ausserorts verwendet werden. So sollte eine unbeeinflusste Fahrt der erfassten Fahrzeuge im normalen Verkehrsablauf gewährleistet sein. Die Bedienung der Pfosten erfolgt über ein externes, batteriebetriebenes Steuergerät.

Zu Beginn jeder Messung müssen die Pfosten zeitlich synchronisiert werden. Dadurch kann ein einzelnes Fahrzeug später in der Auswertung über alle Messpfosten hinweg verfolgt werden. Wird ein Fahrzeug von den beiden unterschiedlich ausgerichteten Infrarotsensoren (jeweils Sender und Empfänger) detektiert, kann aus der Zeitdifferenz die Geschwindigkeit ermittelt werden.

Die folgenden Grössen werden durch die Messpfosten für jedes Fahrzeug erfasst:

1. Fahrzeug ID als fortlaufende Nummerierung
2. Durchfahrtszeit [ms]
3. Fahrzeuglänge [m]
4. Seitlicher Abstand Fahrzeug – Pfosten [cm]
5. Fahrtrichtung [Hin- / Gegenrichtung]

Die erfassten Daten werden je Messeinheit auf einer Speicherkarte zwischengespeichert und müssen im Anschluss an die Messung zur Weiterverarbeitung am PC eingelesen werden. Jede dieser Speicherkarten kann Daten von ca. 4000 Fahrzeugen aufzeichnen.

In der untenstehenden Abbildung (Abb. 4-2) sind auf der linken Strassenseite die Messpfosten aufgestellt, auf der rechten Seite die normalen Kurvenleitpfosten. Der Unterschied zwischen den beiden Pfoarten ist auf den ersten Blick kaum ersichtlich und soll gewährleisten, dass sich die Fahrzeuglenker nicht durch die Messpfosten beeinflussen lassen.

Abbildung 4-2: Messpfosten im Einsatz (linke Strassenseite)



Quelle: eigene Fotografie

4.4.4. Auswertungsprogramm IVT-Spur

Die zur Auswertung der Spurdaten verwendete Software wurde im Zusammenhang mit dem Forschungsauftrag „Fahrverhalten in Kurvenbereichen“ (Spacek 1998) entwickelt. Neben dem Einlesen und Berechnen der Ausgangsdaten kann das Programm die Strassengeometrie nachbilden, die Spur- und Geschwindigkeitsverläufe über die gesamte Messstrecke berechnen und graphisch darstellen sowie einige statistische Berechnungen ausführen.

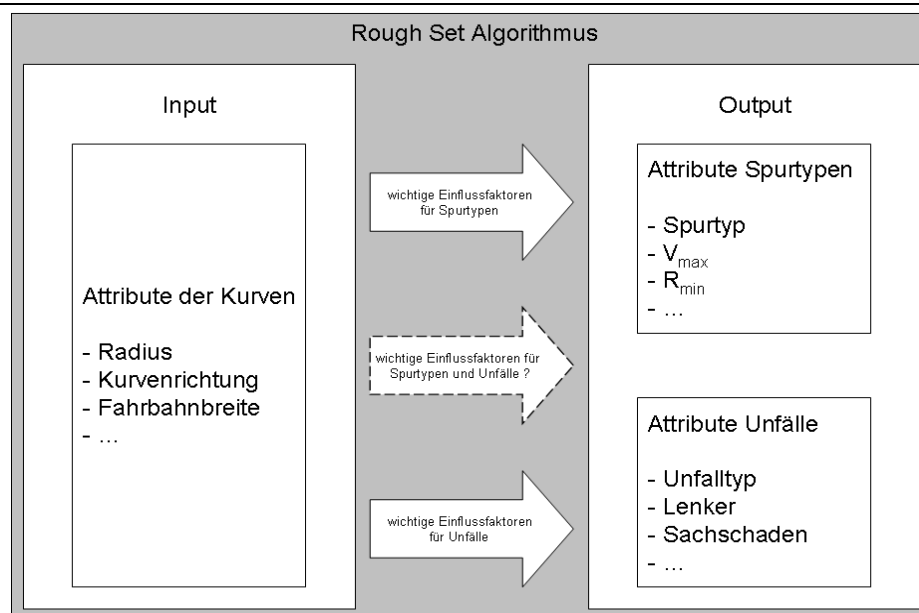
Zur Weiterbearbeitung können die Daten in andere Programme exportiert werden.

4.5. Rough Set Algorithmus

Die Auswertung der empirisch erfassten Daten erfolgte mithilfe der Rough Set Theorie. Der Algorithmus dazu wurde von Zdzislaw I. Pawlak entwickelt (Pawlak 1982). Dabei werden Objekten, z. B. Kurven, verschiedene, kategorisierte Attribute für Input und Output zugeordnet. Anhand der Inputattribute, z. B. Radius oder signalisierte Höchstgeschwindigkeit, wird berechnet, wie wichtig sie für das Eintreffen der Outputattribute, z. B. Spurtypenverteilung oder Unfalltyp, sind. (Greco, Matarazzo et al. 2001; Alessandrini 2008).

Bei der Auswertung der Daten werden die Einflussfaktoren der Kurven auf das Spurverhalten und die Einflussfaktoren der Kurven auf das Unfallgeschehen ermittelt. Dabei ist es das Ziel, diejenigen Faktoren zu bestimmen, die bei beiden Gruppen (Spurtypen und Unfälle) eine Rolle spielen (Abbildung 4-3).

Abbildung 4-3: Vorgehen Rough-Set-Algorithmus



Quelle: eigene Darstellung

Aufgrund der vorhandenen Daten ist es nicht möglich, den direkten Einfluss der Spurtypen auf das Unfallgeschehen zu bestimmen, da die Unfälle nicht aus der gleichen Stichprobe stammen wie die Spurdaten. Konkret wurden

während der Spurmessungen keine Unfälle erfasst. So kann der Einfluss nur indirekt bestimmt werden, indem die beiden Auswertungen einander gegenübergestellt werden (Abb. 4-3, gestrichelter Pfeil).

Die kategorisierten Daten (Input und Output) werden in Form von Wenn-Dann-Beziehungen dargestellt (Tab. 4-2). Konkret gibt der Algorithmus als Resultat eine Vielzahl von Regeln aus. Je mehr Attribute in einer Regel vorkommen und je besser eine Regel den Output beschreiben kann, desto besser ist das Resultat.

Die folgende Tabelle (Tab. 4-2) zeigt Beispiele solcher Regeln. Die erste Regel besagt, wenn die betrachtete Kurve einen Radius der Kategorie 1, die Kurvenrichtung 2 sowie eine Fahrbahnbreite der Kategorie 4 aufweist, dass dann ein Unfall mit dem Unfalltyp 1 mit einer Häufigkeit von 25% auftritt. Weiter kann die Regel 9% aller Unfälle mit Unfalltyp 1 erklären. Der Unfalltyp 5 wird zu 81.8% durch die erste und zu 18.2 % durch die zweite Regel erklärt.

Tabelle 4-2: Resultat Regeln Rough Set Analyse

Wenn...	Dann...	Accuracy ¹⁶ [%]	Coverage ¹⁷ [%]
Radius (1) und Kurvenrichtung (2) und Fahrbahnbreite (4)....	dann Unfalltyp 1 oder Unfalltyp 5	25 75	9.0 81.8
Radius (1) und Kurvenrichtung (1) und Fahrbahnbreite (2)....	dann Unfalltyp 5	1.0	9.2

Quelle: eigene Darstellung

Die empirischen Daten sollen zeigen, ob die zuvor in der Theorie erfassten Faktoren und deren theoretischer Einfluss auf das Spurverhalten auch in der Praxis Bestand haben.

¹⁶ Accuracy gibt an, wie viel Prozent der Unfälle, die durch eine Regel erklärt werden, einem bestimmten Unfalltyp zugeordnet werden können (Summe der Zeilen = 100%).

¹⁷ Coverage gibt an, wie viel Prozent der Unfälle eines Typs durch eine Regel erklärt werden können (Summe der Spalten = 100%).

4.6. SPSS 21

Zur statistischen Auswertung der Daten wurde das Programm IBM SPSS Statistics 21 verwendet. Damit können z.B. lineare Regressionen oder einfaktorielle ANOVAs durchgeführt werden (Brosius 2013).

4.7. Übersicht über die verwendeten Methoden

In den folgenden Tabellen (Tab. 4-3, 4-4) sind die einzelnen Untersuchungsbereiche der vorliegenden Arbeit und die dazu verwendeten Methoden, das Vorgehen und die erwarteten Resultate sowie das Ziel der verwendeten Methode zusammengefasst.

Tabelle 4-3: Verwendete Methoden (1/2)

Bereich	Methode	Vorgehen und erwartete Resultate	Ziel
Theorie	Literaturrecherche	Wo gibt es Zusammenhänge in den Bereichen „Verkehrstechnik“ und „Wahrnehmung, psychologische Aspekte“ des Spurverhaltens sowie „Unfallgeschehen“, was lässt sich aus der Literatur über das Spurverhalten in der Kurve ableiten?	→ Definition der Hypothesen
	Fehlerbaumanalyse	Systematische Zusammenhänge zwischen Unfallgeschehen und dem System „Fahrer-Fahrzeug-Infrastruktur“ zeigen. Erkennen, welche Einflüsse zu welchen Unfalltypen führen können, welche Spurtypen einen möglichen Einfluss auf diese Unfalltypen haben.	→ Finden der zu untersuchenden Attribute für die Rough Set Analyse.

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 4-4: Verwendete Methoden (2/2)

Bereich	Methode	Vorgehen und erwartete Resultate	Ziel
Unfalldaten	VUA	Statistische Auswertungen zu Unfallhäufigkeit, Unfalldichte, zeitliche Entwicklungen. Welche Kurven weisen erhöhte Unfallzahlen auf, welche Rolle spielt die Verkehrsmenge auf einer Strecke, welche Unfalltypen sind besonders häufig anzutreffen?	→ Unfalldaten für Rough Set Analyse (Output)
Spurdaten	Messpfosten	Empirische Datenerfassung der einzelnen Fahrzeugspuren, Abstände zum Fahrbahnrand und Geschwindigkeiten	→ Kurven- und Spurdaten für Rough Set Analyse (Input)
	IVT-Spur	Auswertung der gemessenen Fahrspuren der einzelnen Fahrzeuge und des gesamten Spurverhaltens einer Kurve nach Art der Fahrspur, Geschwindigkeit, Querschleunigung, gefahrenen Radien. Geschwindigkeitsniveau des gesamten Spurverhaltens einer Kurve.	→ Spurdaten für Rough Set Analyse (Output)
Spur- und Unfalldaten	Rough Set Analyse	Einfluss von Input (Kurve) auf Output (Unfälle, Spurtypen). Welche Parameter der Kurve haben einen Einfluss auf das Spurverhalten und das Unfallgeschehen? Haben die gleichen Faktoren bei beiden Outputgruppen einen Einfluss?	→ Beantwortung der Hypothesen aus Kapitel 3.
	SPSS 21	Regressionsanalysen, einfaktorielle ANOVA zur Bestimmung der signifikanten Einflussparameter der Spur- und Unfalldaten	→ Beantwortung der Hypothesen aus Kapitel 3.

Quelle: eigene Darstellung

5. Einsatz der Fehlerbaumanalyse

5.1. Grundlagen

In der vorliegenden Arbeit soll einerseits das Spurverhalten in Kurven untersucht werden. Dabei wird angenommen, dass die Wahrnehmung der Kurve durch den Fahrzeuglenker das Spurverhalten beeinflusst. Andererseits ist anzunehmen, dass menschliches Versagen oder Fehlverhalten bei allen Unfalltypen eine mögliche Unfallursache sein kann. Dieses Fehlverhalten führt in der Folge entweder zu einem Lenkfehler oder zu einem Haftreibungsverlust. Wie bereits in Kapitel 2.6 erwähnt, reicht die vorhandene Zahl der Unfälle in den Untersuchungskurven nicht aus, um eine signifikante statistische Auswertung zu machen. Zudem werden Fastunfälle, welche ebenfalls Hinweise auf ungünstiges Spurverhalten geben können, polizeilich nicht erfasst und sind auch während einer Messung nicht immer direkt festzustellen.

In der Fehlerbaumanalyse werden die Systemfunktionen eines technischen Systems, die nicht vom System beeinflussbaren Umgebungsbedingungen, die Hilfsquellen, die Komponenten des Systems und die Organisation und das Verhalten des Systems untersucht¹⁸.

Hier soll das System der Unfall oder der Fastunfall sein (Tab. 5-1), mit den Funktionssystemen der einzelnen Unfallgruppen, den Unfalltypen als Teilsystemen und den Komponenten Fahrer, Fahrzeug und Infrastruktur.

¹⁸ DIN 25424, Teil 1, Fehlerbaumanalyse - Methode und Bildzeichen, September 1981

Tabelle 5-1: System

System	Unfall / Fastunfall					
Funktionssystem	Unfallgruppen					
Teilsystem	Unfalltypen					
Komponenten	Fahrer		Fahrzeug		Infrastruktur	
Funktionselemente	Psycho- logie	Physio- logie	Zustand	Art	Strasse	Strassen- raum

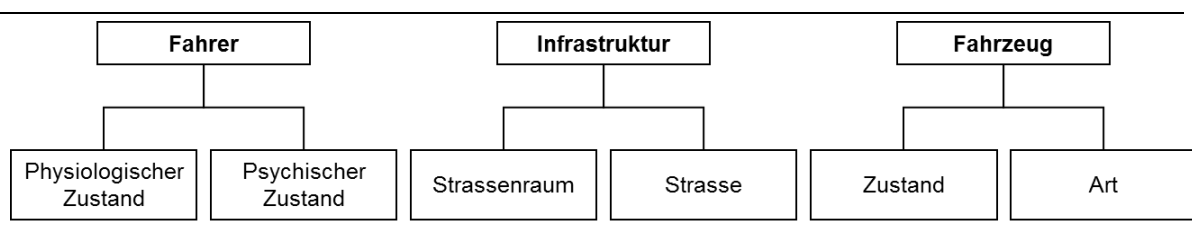
Quelle: eigene Darstellung

5.2. Systemanalyse

5.2.1. Komponenten des Gesamtsystems

In diesem Kapitel wird das Gesamtsystem „Fahrer-Fahrzeug-Infrastruktur“ analysiert. Um zu verstehen, welche Faktoren einen direkten oder indirekten Einfluss auf das Spurverhalten haben, wird dieses Gesamtsystem in Teilsysteme zerlegt.

Das Gesamtsystem (Abb. 5-1), welches zum Ziel hat, die möglichen Einflussfaktoren auf das Spurverhalten zu benennen, besteht im Wesentlichen aus drei Teilsystemen. Das erste ist der Fahrer. Er führt die einzelnen Handlungen im Gesamtsystem aus. Der Fahrer lenkt das Fahrzeug, welches das zweite Teilsystem bildet, auf der Strasse in einem Strassenraum. Die beiden letzten bilden zusammen das Teilsystem Infrastruktur. Fahrzeuge beeinflussen sich gegenseitig direkt oder indirekt während der Fahrt, und Verkehrsunfälle ereignen sich in einem dynamischen Verkehrsablauf.

Abbildung 5-1: Komponenten des Gesamtsystems

Quelle: eigene Darstellung

5.2.2. Zusammenhänge zwischen den Komponenten

Der zentrale Faktor im Gesamtsystem ist der Lenker des Fahrzeuges. Merkmale wie Alter, Geschlecht, Dauer des Fahrausweisbesitzes oder Streckenkenntnis sind Teile seiner Persönlichkeit. Daneben gibt es eine Anzahl momentaner Eigenschaften resp. Zustände, darunter psychische wie Glücksgefühle, Ärger, Stress oder physische wie Übelkeit oder Ermüdung. Kurzfristige Einflüsse können auch Medikamente oder Alkohol haben. Die Summe dieser Eigenschaften führt zur momentanen Fähigkeit der Informationswahrnehmung und Informationsverarbeitung. Die Informationen, welche der Lenker während seiner Fahrt erhält, stammen von den Teilsystemen Fahrzeug und Infrastruktur. Vom Fahrzeug erhält der Lenker akustische, optische und haptische Informationen zur Fahrt, das Fahrzeug selbst beeinflusst durch seine Eigenschaften und seinen Zustand das Fahrverhalten. Aus der Infrastruktur bezieht der Lenker Informationen z.B. zum Strassenzustand, zum Verlauf der Strecke oder Orientierungshilfen durch Markierungen und Signalisationen. Häufig ist ein Fahrer nicht alleine unterwegs, sondern das Fahrzeug befindet sich im Verkehrsablauf mit anderen Fahrzeugen, die seine Fahrt durch ihre Geschwindigkeitswahl oder Position auf der Fahrbahn beeinflussen.

Die verarbeiteten Informationen fließen ins Fahrverhalten und haben ein bestimmtes Spurverhalten zur Folge. Das Spurverhalten ist dynamisch und zwingt den Lenker, ständig neue Informationen zu verarbeiten. Dadurch entsteht ein Rückkopplungsprozess von kontinuierlicher Wahrnehmung von Informationen und deren Verarbeitung. Am Schluss steht die Frage, welches Spurverhalten welchen Einfluss auf das Unfallgeschehen haben könnte.

In der Literatur gibt es bereits Ansätze, den Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Strasse zu erklären.

Fell (Fell 1976) unterteilt in seinem Modell den Informationsfluss in einer Fahraufgabe in die Bereiche Fahrer, Fahrzeug, Umwelt. Er wendet sein Modell auf die Ursachenforschung von Strassenverkehrsunfällen an und betrachtet vor allem die menschliche Informationsverarbeitung und Gründe für Fehlverhalten, welches zu Unfällen führt.

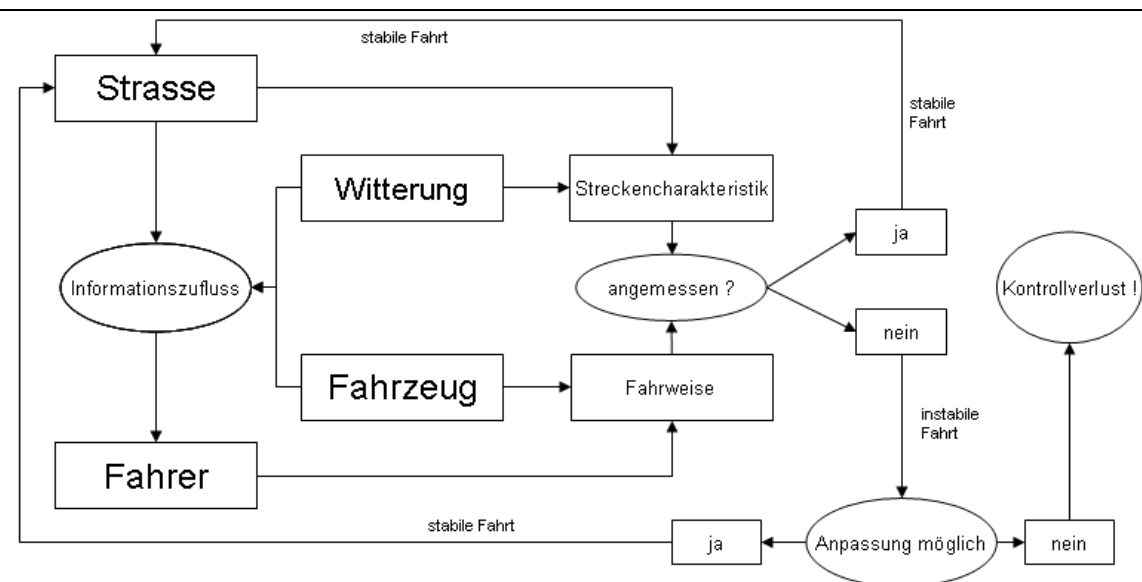
1978 entwickelte Donges (Donges 1978) ein Zwei-Stufen-Modell des Fahrer-Lenkungs-Verhaltens, welches besagt, dass ein Lenker voraus-

schauend Informationen zur Orientierungshilfe (anticipatory control) und stabilisierende Informationen (compensatory control) aus der Differenz der aktuellen Fahrtrichtung und der gewünschten Richtung benötigt.

Herberg (Herberg 1983) stellt ein vereinfachtes Systemmodell mit vier Teilsystemen vor. Er definiert die Teilsysteme Fahrer, Fahrzeug, Strasse und Gesellschaft, welche sich alle gegenseitig beeinflussen. Weiter verweist er auf ein Pfadmodell, welches einerseits die Einflüsse von Merkmalen der Strasse aufeinander und andererseits auf die gefahrene Geschwindigkeit darstellt (Herberg 1983). Herberg befasst sich in seiner Studie nicht weiter mit dem Gesamtsystem.

Bakaba (Bakaba 2005) geht davon aus, dass das Fahrverhalten eines Fahrers von bestimmten streckencharakteristischen Merkmalen beeinflusst wird und die Fahrweise in der Folge angemessen oder nicht angemessen sein kann (Abb. 5-2). Über die Möglichkeit, die Fahrweise anzupassen, schliesst er auf eine erneut stabile Fahrt oder einen Kontrollverlust. Bakaba gibt in seinem Modell aber keine Hinweise zur Wahrscheinlichkeit eines Kontrollverlustes.

Abbildung 5-2: Modellierung einer Fahrt im Regelkreis „Fahrer-Fahrzeug-Strasse“



Modellierung einer Fahrt im Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Strasse
Quelle: Bakaba, Sossoumihen, 1999

Quelle: Bakaba, Sossoumihen 1999

In der vorliegenden Arbeit sollen sowohl die Aspekte der Wahrnehmungspsychologie und des Sehverhaltens als auch verkehrstechnische Aspekte zur Strassengeometrie, Strassenraumgestaltung, Streckencharakteristik und Geschwindigkeitsverhalten miteinander verknüpft werden, um das Spurverhalten bei der Durchfahrt einer Kurve zu analysieren.

5.2.3. Komponenten

Um eine bessere Übersichtlichkeit zu gewährleisten, wird das Gesamtsystem in seine Komponenten zerlegt und diese detailliert betrachtet. In Kapitel 5.2.4 wird auf die Merkmale und Eigenschaften des Fahrzeuglenkers eingegangen, Kapitel 5.2.5 handelt von der Komponente Fahrzeug und Kapitel 5.2.6 von der Infrastruktur.

5.2.4. Komponente Fahrer

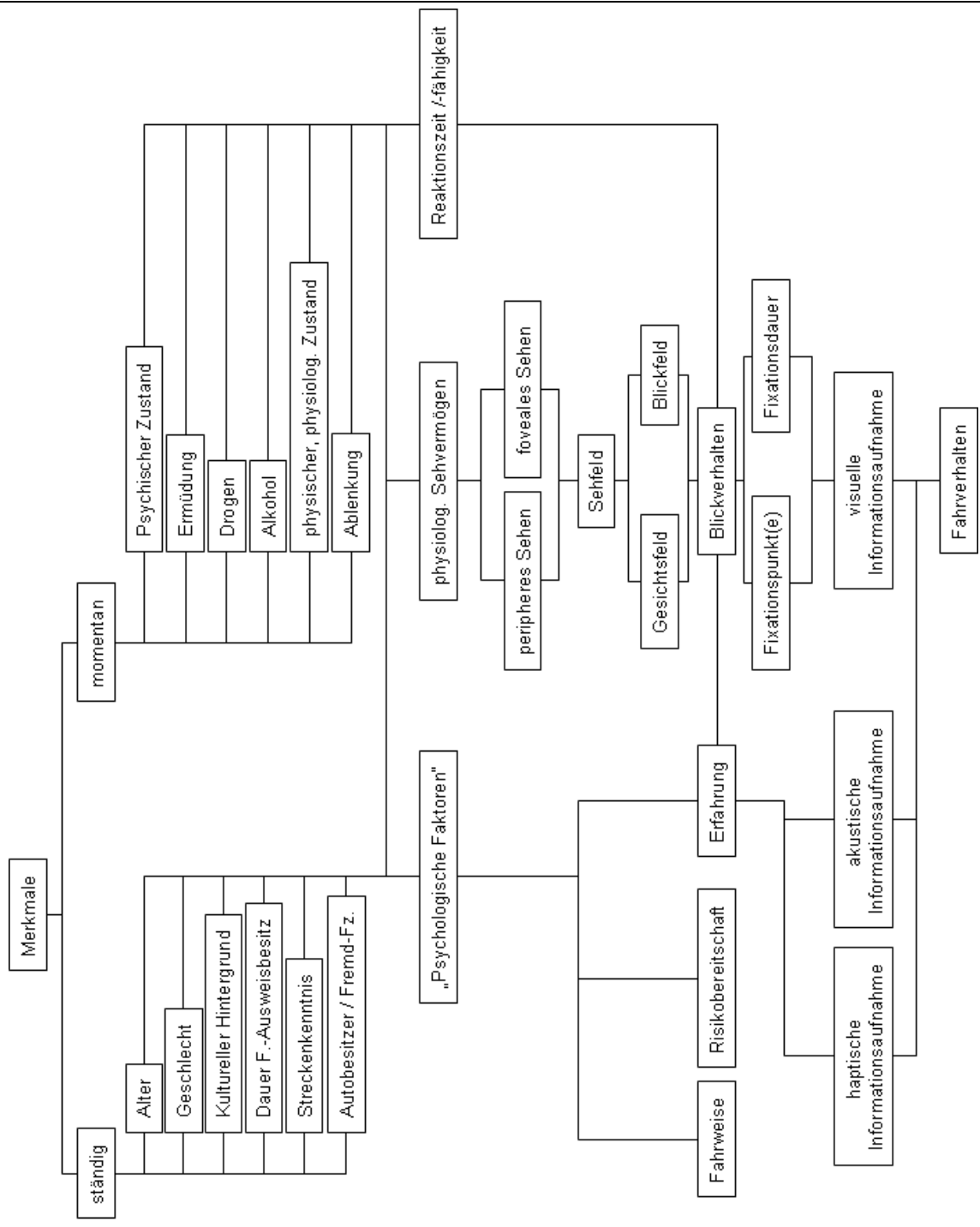
Wie bereits in Kapitel 5.2.1 erwähnt, ist der Fahrer im Gesamtsystem derjenige, der alle Handlungen ausführt. Er beeinflusst einerseits durch seine Bewegungen die Fahrt und wird andererseits durch das Fahrzeug, den Strassenraum und die Strasse sowie den Verkehrsablauf beeinflusst. Der Fahrer kann durch konstante Faktoren wie Alter, Geschlecht, kulturellen Hintergrund oder Streckenkenntnis charakterisiert werden. Er hat seinen Fahrausweis bereits eine bestimmte Zeit, ist Besitzer des Fahrzeuges oder mit einem Fremdwagen unterwegs, und er kennt die Strecke, die er befährt, zwischen sehr gut und gar nicht. Zu den momentanen Faktoren gehört die psychische Verfassung, z.B. Freude, Ärger, Stress oder Unkonzentriertheit. Weitere mögliche temporäre Einflüsse sind Ermüdung, Drogen, Medikamente und Alkoholkonsum. Sowohl die ständigen als auch die temporären Faktoren haben einen Einfluss auf die Reaktionsfähigkeit, das Sehvermögen und weitere Merkmale psychologischen Ursprungs wie die Fahrweise, die Risikobereitschaft oder die nutzbare Erfahrung.

Der wichtigste Sinn beim Lenken eines Fahrzeuges ist das Sehvermögen. Es kann unterteilt werden in das foveale, zentrale Sehen und das periphere, seitliche Sehen. Beide zusammen bilden das Sehfeld. Dieses kann wiederum in das Gesichtsfeld und das Blickfeld unterteilt werden. Mit Gesichtsfeld

wird der Bereich bezeichnet, den man ohne Augenbewegung erfassen kann, im Gegensatz dazu umschreibt das Blickfeld den Bereich, der mit Hilfe von Augenbewegungen, ohne den Kopf zu bewegen, erfasst werden kann (Steyer 2004). Das Blickverhalten, bestehend aus Fixationspunkten und Fixationsdauer, ermöglicht es dem Lenker, Informationen zu erkennen. Das Blickverhalten gibt auch Aufschlüsse darüber, zu welchem Zeitpunkt ein Fahrer welches Objekt wie lange betrachtet, und es gibt ebenfalls Hinweise auf die Fahrerfahrung eines Lenkers (Mourant, Ronald R., Rockwell 1972; Dilling 1973; Cohen 1985). Aus den so detektierten fahrrelevanten Hinweisen folgen bewusste und unbewusste Lenkbewegungen.

Die einzelnen Komponenten des Fahrers sind in der folgenden Abbildung (Abb. 5-3) dargestellt.

Abbildung 5-3: Komponente Fahrer



Quelle: eigene Darstellung

5.2.5. Komponente Fahrzeug

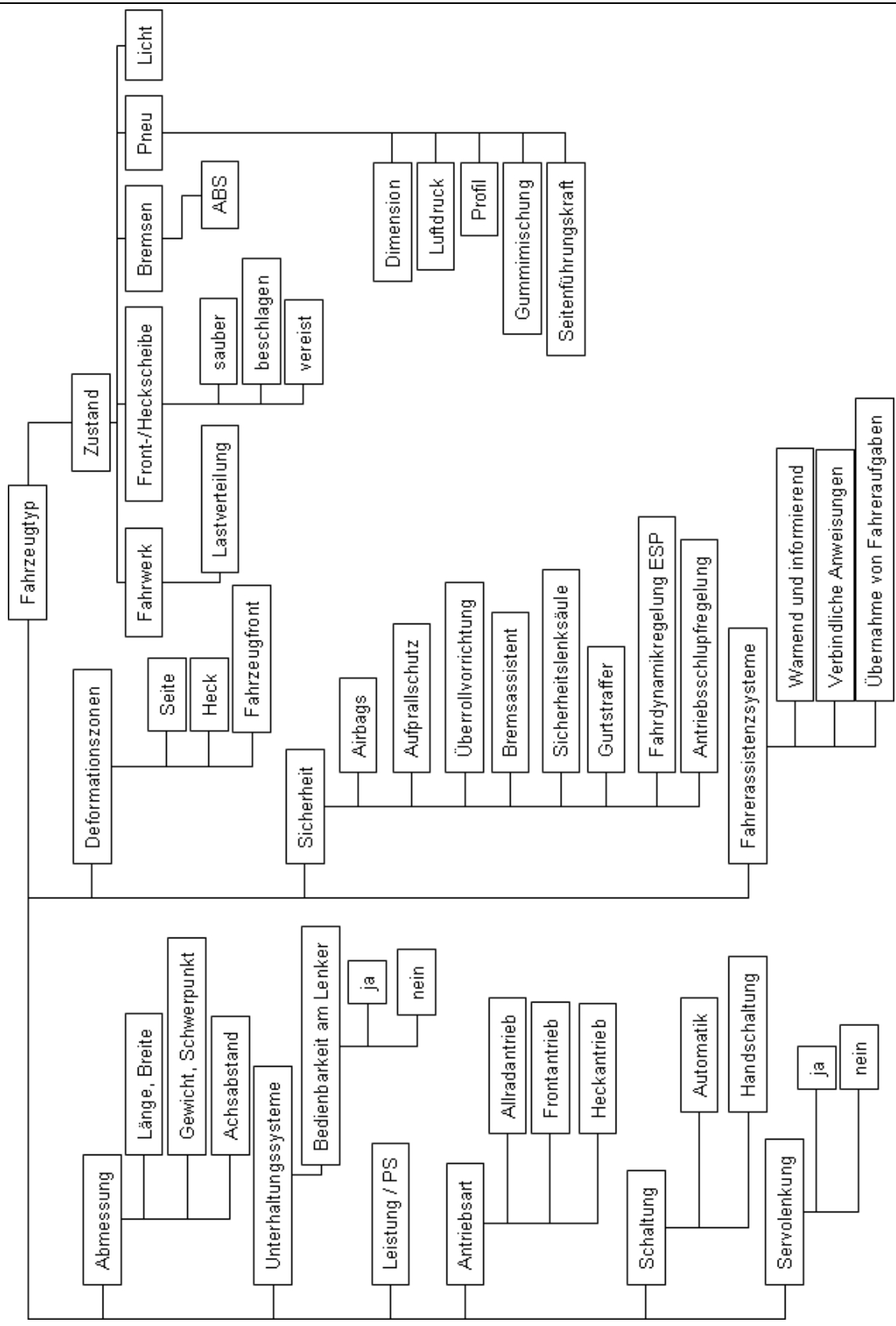
Das Fahrzeug ist definiert durch den Fahrzeugtyp wie Personenwagen, Lieferwagen oder Lastwagen. Personenwagen lassen sich in diverse Untertypen gliedern, wie z.B. Limousine, Kombi, SUV oder Sportwagen. Jedes Fahrzeug ist gekennzeichnet durch bestimmte Abmessungen, Leistung, Antriebsart oder vorhandene Fahrerassistenzsysteme. Neben diesen Modelleigenschaften sind die einzelnen Komponenten jedes Fahrzeuges in einem momentanen Zustand. Für diese Arbeit ist neben dem Zustand des Fahrwerkes und der Bremsen vor allem derjenige der Pneu relevant. Ein Fahrzeugpneu hat bestimmte Abmessungen, eine Gummimischung, vorhandenes Profil und Luftdruck. Je nach Eigenschaft ist die Haftung auf der Strasse besser oder schlechter, d.h. je besser die Haftreibung ist, desto mehr Querkräfte können in einer Kurve aufgenommen werden. Zudem hat ein Fahrzeug mit einem tieferen Schwerpunkt eine bessere Kurvenlage und kann deshalb eine Kurve auch schneller durchfahren.

Es kann allgemein angenommen werden, dass die Charaktereigenschaften und Vorlieben eines Lenkers die Wahl seines Autos und damit auch die Fahrweise beeinflussen.

Da in dieser Arbeit keine Erhebungen zu den einzelnen Fahrzeugen gemacht werden, können Aussagen zum Fahrzeugpark und zum physikalischen Verhalten eines Fahrzeuges nur allgemein gehalten werden.

Die einzelnen Komponenten des Fahrzeuges sind in der folgenden Abbildung (Abb. 5-4) dargestellt.

Abbildung 5-4: Komponente Fahrzeug



Quelle: eigene Darstellung

5.2.6. Komponente Infrastruktur

Das Teilsystem Infrastruktur besteht zum einen aus der Strasse selbst und zum andern aus dem gesamten Strassenraum. Jede Strasse in der Schweiz kann einem der folgenden Strassentypen (Tab. 5-2) zugeordnet werden:

Tabelle 5-2: Strassentypen

Strassentyp		Merkmale		
		Bedeutung im Strassennetz	Massgebende Netzfunktion	Verkehrliche Aufgaben
Hochleistungsstrasse	HLS	international bis regional	durchleiten	Hohe Leistungen und Sicherheit bei grossen Geschwindigkeiten
Hauptverkehrsstrasse	HVS	national bis zwischenörtlich	verbinden	Hohe Leistungen und Sicherheit bei mittleren Geschwindigkeiten
Verbindungsstrasse	VS	regional od. zwischenörtlich	verbinden	Gewährleisten von untergeordneten Verbindungen bei begrenzter Leistung und Geschwindigkeit
Sammelstrasse	SS	örtlich	sammeln	Konzentration des Erschliessungsverkehrs in Siedlungsgebieten
Erschliessungsstrasse	ES	quartierintern	erschliessen	Parzellenweise Erschliessung

Quelle: SN 640 040b¹⁹

Wird das Strassennetz nach Strasseneigentümern unterteilt, so zeigt sich, dass rund 97.5% Kantons- und Gemeindestrassen und weniger als 3% richtungstrennte Nationalstrassen sind (Tab. 5-3).

¹⁹ SN 640 040b, Projektierung, Grundlagen; Strassentypen, VSS Zürich, 1992

Tabelle 5-3: Streckennetz nach Verkehrsträgern in Kilometern

	2010*	davon ausserorts **	richtungsgetreunt
Strasse	71'452		
Nationalstrassen	1'790	384	z.T.
davon Autobahnen	1'406	-	ja
Kantonsstrassen	18'040	11'900	nein
Gemeindestrassen	51'622	22'100	nein

Quelle: * bfs 2012, ** (Ewert, Eberling 2009)

In der vorliegenden Arbeit werden nur Kurven der beiden Strassentypen Hauptverkehrsstrasse und Verbindungsstrasse betrachtet. Die Untersuchungskurven liegen allesamt ausserorts.

Zu den geometrischen Elementen einer Kurve gehören Radius²⁰, Übergangsbogen, Kreisbogen²¹, Fahrbahnbreite²², Quer- und Längsneigung^{23,24} und der Winkel der Richtungsänderung. Ein weiteres Element ist die Fahrbahnmarkierung²⁵, welche aus Rand- und/oder Mittelmarkierung besteht und durchgezogen oder gestrichelt sein kann. Eine Markierung ist nicht zwingend in allen Kurven vorhanden. In Kurven werden häufig Kurvenleitpfeile zur

²⁰ SN 640 080b, Projektierung, Grundlagen – Geschwindigkeit als Projektierungselement; VSS Zürich, 1981

²¹ SN 640 100a, Linienführung – Elemente der horizontalen Linienführung, VSS Zürich, 1997

²² SN 640 201, Geometrisches Normalprofil, Grundabmessungen und Lichtraumprofil der Verkehrsteilnehmer, VSS Zürich, 1992

²³ SN 640 120, Linienführung; Quergefälle in Geraden und Kurven, Quergefälleänderung VSS Zürich, 1996

²⁴ SN 640 110, Linienführung – Elemente der vertikalen Linienführung, VSS Zürich, 1983

²⁵ SN 640 862, Markierungen – Anwendungsbeispiele für Haupt- und Nebenstrassen, VSS Zürich, 1993

besseren Sichtbarkeit aufgestellt oder Geschwindigkeitsbeschränkungen und/oder Warntafeln angebracht²⁶.

Die Materialeigenschaften der Fahrbahndeckschicht bestimmen das Haftreibungsvermögen einer Kurve.

Zum Strassenraum im weiteren Sinn gehören der Streckenverlauf und damit die Kurvigkeit. Die Kurvigkeit beeinflusst u. a. auch die vorhandenen Sichtweiten²⁷. Die Bepflanzungsart²⁸ neben der Strasse ist ein weiterer Faktor für die Sichtweiten und kann zusätzlich helfen, die Linienführung zu verdeutlichen. Es wird in dieser Arbeit unterschieden zwischen einem Streckenabschnitt auf freiem Feld, im Wald oder einem mit einzelnen Bäumen resp. Alleen. Ein weiterer Faktor, der das Erscheinungsbild des Strassenraumes prägt, sind Bauten. Hier sind neben Kunstbauten auch künstliche Böschungen (Einschnitte mit Sichtbehinderung und Aufschüttungen ohne Sichtbehinderungen), Leitschranken oder Bankette subsumiert.

Je nach Witterungsverhältnissen beschränken die Sichtverhältnisse die Fahrt oder zwingt der Strassenzustand zu angepasster Fahrweise. Bei der Fahrt durch Alleen mit Sonneneinstrahlung kann es zum sogenannten Flickereffekt kommen, der durch seine hell-dunkel Kontraste störend wirken kann.

Neben der sichtbaren Linienführung trägt die aus verschiedenen Elementen entstehende optische Breite²⁹ (Leemann 2007) entscheidend zur Geschwindigkeitswahl bei.

Die einzelnen Komponenten der Infrastruktur sind in der nachfolgenden Abbildung (Abb. 5-5) dargestellt.

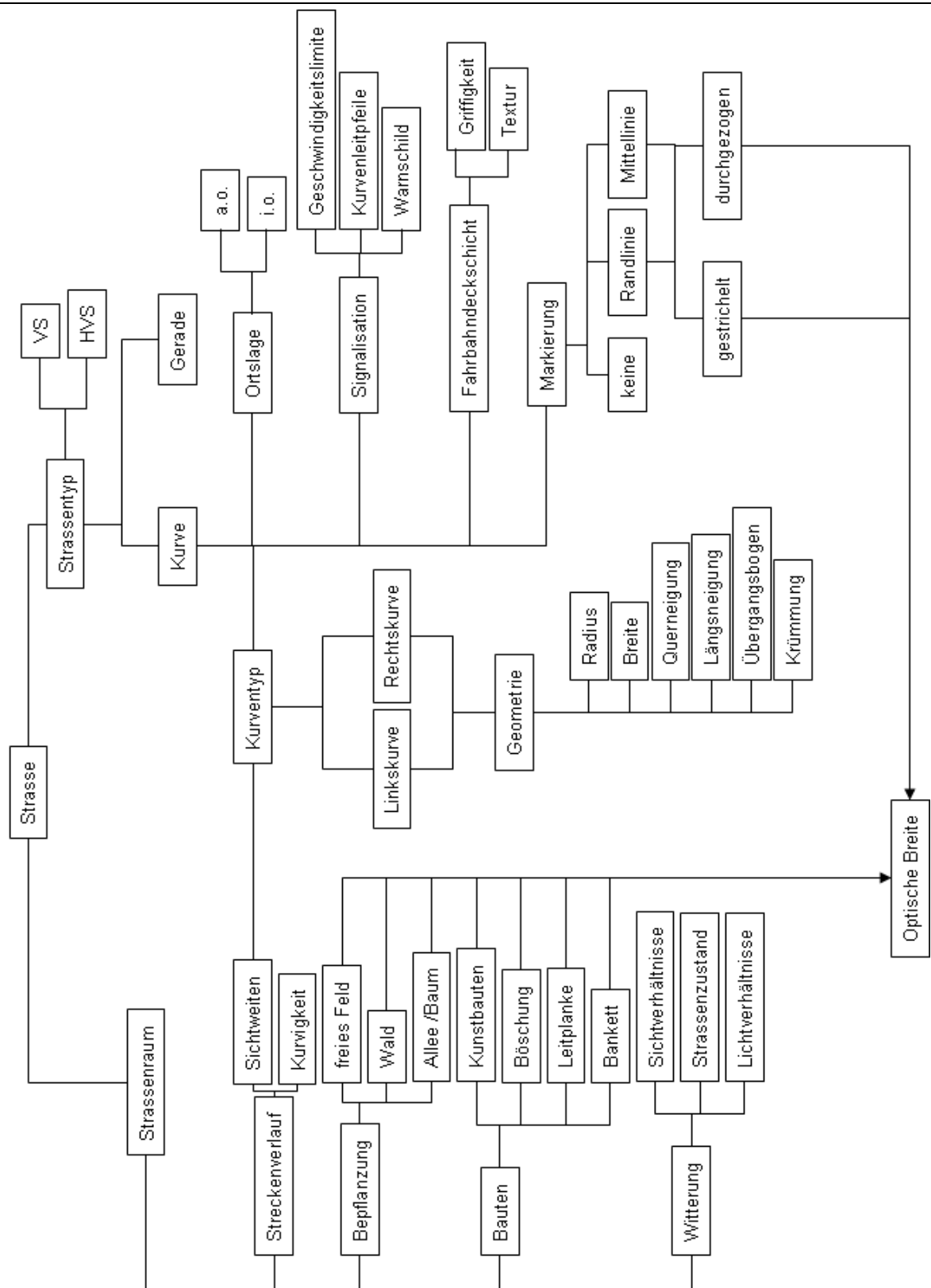
²⁶ SN 640 723, Strassenverkehrssicherheit – Inspektion, VSS Zürich, 2013

²⁷ SN 640 090b, Projektierung, Grundlagen; Sichtweiten, VSS Zürich, 2001

²⁸ SN 640 560, Passive Sicherheit im Strassenraum - Grundnorm, VSS Zürich, 2005

²⁹ SN 640 212, Entwurf des Strassenraumes; Gestaltungselemente, VSS Zürich, 2000

Abbildung 5-5: Komponente Infrastruktur



Quelle: eigene Darstellung

5.3. Teilsystem Unfalltypen

Die Komponenten des Gesamtsystems (Fahrer, Fahrzeug, Infrastruktur) wurden in der bisherigen Analyse unabhängig von den verschiedenen Unfalltypen betrachtet. Um später den eigentlichen Fehlerbaum aufstellen zu können, wird zusätzlich das Teilsystem der Unfalltypen benötigt. Die Auswahl der betrachteten Unfalltypen erfolgt aufgrund der Konfliktsituation.

Die Unfallgruppen und -typen sind in der SN 640 947³⁰ definiert und werden in den Unfallaufnahmeprotokollen der Polizei auch so verwendet. Deshalb werden sie hier unverändert übernommen. Die Auswahl der Unfalltypen (Tab. 5-4) für die Analyse des Fehlerbaumes wurde aufgrund der Frage getroffen: Kann ein ungünstiges Spurverhalten im Kurvenbereich zu diesem Unfalltyp führen?

Tabelle 5-4: Unfalltypen

Kategorie	Unfalltyp	Konfliktsituation
Schleuder- oder Selbstunfall	01	Ohne Kollision
	03	Kollision mit Hindernis ausserhalb der Fahrbahn
	05	Beim Ausweichen, ohne Kollision
	06	Beim Ausweichen, mit Kollision
	10	Kollision mit Gegenverkehr
Überholunfall	60	Frontalkollision mit Gegenverkehr (ohne Überholen)
Frontalkollision	61	Streifen mit Gegenverkehr (ohne Überholen)

Quelle: ASTRA³¹

³⁰ SN 640 947, Katalog für Strassendaten – Strassenverkehrsunfälle, VSS Zürich, 2004

³¹ MISTRA - Managementinformationssystem Strasse und Strassenverkehr Fachapplikation Verkehrsunfälle (VU) Instruktionen zum Unfallaufnahmeprotokoll (UAP), Anhang 1: Unfalltypen, Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern, Version 4.21, 6.12.2010

5.4. Festlegung des unerwünschten Ereignisses und der Ausfallkriterien

Das unerwünschte Ereignis ist in der vorliegenden Analyse der Unfall. Ein Unfall hat Sach- oder Personenschaden oder beides zur Folge. Die hier einbezogenen Unfälle sind alle polizeilich erfasst worden. Fastunfälle haben keine unmittelbaren Folgen für Fahrzeug und Lenker. Dazwischen gibt es kleinere Selbstunfälle, welche der Polizei nicht gemeldet werden und somit auch nicht in die Auswertung einfließen. Aufgrund der bereits erwähnten Annahme von Shinar (Shinar 1984), dass die Ursachen für Fastunfälle die gleichen seien wie für Unfälle, sollten auch die Ursachen dieser nichterfassten Unfälle abgedeckt sein.

Ein Ausfallkriterium für Fastunfälle, im Gegensatz zu den Unfällen, kann wegen der fehlenden Folgen nicht klar definiert werden. Weil aber postuliert wurde, dass die Ursachen für beide Ereignisse als identisch angenommen werden können, wird in der folgenden Analyse kein Unterschied gemacht, ob ein Unfall tatsächlich passiert oder ob er nur beinahe so passiert wäre.

In den in der Schweiz verwendeten Unfallaufnahmeprotokollen ist die Unfallursache ein Merkmal, das aufgenommen wird. In den Instruktionen zum Unfallaufnahmeprotokoll (Tab. 5-5) finden sich in den ersten vier Ursachengruppen insgesamt 181 Unfallursachen, in Gruppe fünf 26 und in Gruppe neun zwei unbekannte Ursachen. Es werden jedoch keine Zusammenhänge oder Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Ursachen hergestellt.

Die für diese Forschungsarbeit verwendeten Unfallaufnahmeprotokolle hatten bezüglich Unfallursachen keine sehr grosse Aussagekraft. Deshalb werden die Unfallursachen, wie sie in Tabelle 5-5 dargestellt sind, nicht direkt weiter verwendet, sondern es werden die möglichen Einflussfaktoren für die nächsten Schritte der Fehlerbaumanalyse betrachtet.

Tabelle 5-5: Unfallursachen

Gruppen	Untergruppen
1 Direkter Einfluss des Lenkers	11 Zustand / Absicht des Lenkers
	12 Beeinträchtigung Sicht des Lenkers
	13 Nichtbeachten von Zeichengebung oder Signalisation
	14 Missachten der Lichtsignale
	15 Mangelhafte Bedienung des Fahrzeuges
	16 Ladung oder Besetzung des Fahrzeuges
	17 Unaufmerksamkeit oder Ablenkung
2 Äusserer Einfluss	21 Mangel an der Strassenanlage
	22 Momentan äusserer Einfluss
	23 Einfluss durch Dritte
3 Mängel am Fahrzeug	31 Mangelhafter Unterhalt
	32 Technische Defekte am Fahrzeug
4 Verkehrsablauf / Verkehrsregeln	41 Geschwindigkeit
	42 Links- / Rechtsfahren und Einspuren
	43 Überholen (Situation)
	44 Überholen (Verkehrsablauf)
	45 Missachten des Vortrittsrechts
	46 Andere Fahrbewegungen
	47 Fahrrad- und Motorfahrradverkehr
	48 Fahrzeugähnliche Geräte (FäG)
5 Direkter Einfluss des Fussgängers	51 Zustand des Fussgängers
	52 Einfluss oder Verhalten des Fussgängers
9 Unbekannte Ursache	91 Unbekannte Ursache

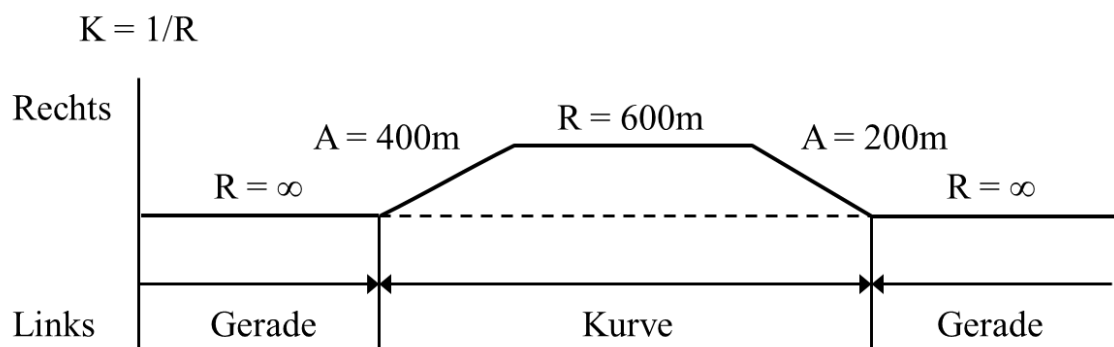
Quelle: ASTRA³²

³² MISTRA – Managementinformationssystem Strasse und Strassenverkehr; Fachapplikation Verkehrsunfälle (VU); Instruktionen zum Unfallaufnahmeprotokoll (UAP); Anhang 2: Ursachen und Hauptursache, Bundesamt für Strassen ASTRA, 2010, Version 4.1, 27.5.2010

5.5. Festlegung des Zeitintervalls

Das für den vorliegenden Fehlerbaum betrachtete Zeitintervall ist die Zeit, die ein Fahrer benötigt, um durch die jeweilige Kurve zu fahren. Eine Kurve wird durch ihr Krümmungsband definiert. Die Krümmung K ist definiert als $K = 1/R$ mit R gleich dem Radius des Kreisbogens (Abb. 5-6).

Abbildung 5-6: Krümmungsband einer Kurve



R = Radius

K = Krümmung

A = Klothoidenparameter

Quelle: eigene Darstellung nach³³

Die hier betrachtete Kurvenfahrt beginnt, wenn die Front des Fahrzeuges den Übergangsbogenanfang überquert und endet, wenn das Heck des Fahrzeuges den Übergangsbogen nach dem Kreisbogen verlässt. Die Dauer dieses Intervalls ist je nach Kurvenlänge und gefahrener Geschwindigkeit unterschiedlich lang, bewegt sich aber immer im Bereich einiger Sekunden.

Um weitere Daten, wie z.B. Geschwindigkeitsdifferenzen vor und in der Kurve zu untersuchen, werden die empirischen Daten bereits auf der Annäherungsstrecke, d.h. auf der Geraden vor der Kurve, erfasst.

³³ RE 2012: Richtlinien zum Planungsprozess und für die einheitliche Gestaltung von Entwurfsunterlagen im Straßenbau (RE), Ausgabe 2012, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2012

5.6. Bestimmung der Ausfallarten der Komponenten

In der Fehlerbaumanalyse nach DIN EN 61025³⁴ werden die verschiedenen Komponenten Fahrer, Fahrzeug und Infrastruktur weiter in Funktionselemente unterteilt. Beim Ausfall eines Funktionselementes wird das Versagen in drei Typen unterteilt:

1. Primärer Ausfall
2. Sekundärer Ausfall
3. Kommandierter Ausfall

Ein Primärer Ausfall liegt vor, wenn eine Komponente bei zulässigen Einsatzbedingungen versagt. Ein Beispiel hierfür wäre das Reißen eines Zahnriemens. Der Sekundäre Ausfall oder Folgeausfall tritt auf, wenn eine Komponente bei nicht zulässigen Einsatzbedingungen verwendet wird, z.B. wenn ein Pneu die Luft verliert, nachdem man über einen Nagel gefahren ist. Der dritte Ausfall, der Kommandierte Ausfall, ist auf menschliches Versagen zurückzuführen, wie z.B. ein Auffahrunfall mit Blechschaden, weil der Lenker zu spät gebremst hat.

Für die weiteren Analysen wird der Primäre Ausfall nicht betrachtet. Er tritt unabhängig vom Verhalten des Fahrzeuglenkers auf und ist keine Folge des Fahr- bzw. Spurverhaltens. Der Sekundärausfall kann aufgrund menschlichen Versagens auftreten, ihm zugrunde liegt aber in diesem Fall ein Kommandierter Ausfall. In der vorliegenden Arbeit interessiert das menschliche Fehlverhalten. Bei den weiteren Betrachtungen wird deshalb nur der Kommandierte Ausfall analysiert.

In den folgenden Kapiteln 5.7 und 5.10 wird näher auf die physikalischen Vorgänge, die als Folge des menschlichen Versagens zu einem Unfall führen können, eingegangen.

³⁴ DIN EN 61025:2007-08 Fehlzustandsbaumanalyse

5.7. Exkurs Fahrdynamik

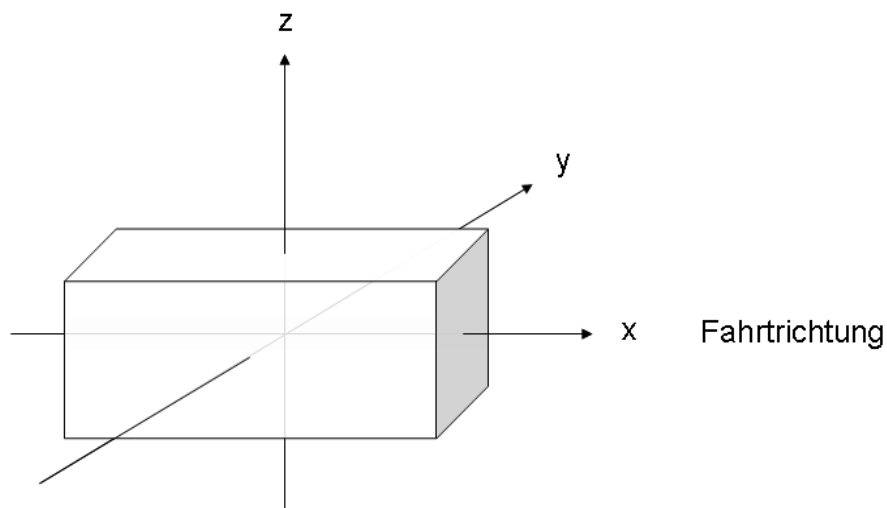
5.7.1. Einleitung

Um die physikalischen Versagensarten (Kapitel 5.7.6) analysieren zu können, werden in den folgenden Kapiteln 5.7.25.7.5 einige Definitionen und Vorgänge der Fahrdynamik von Fahrzeugen auf Strassen näher betrachtet.

5.7.2. Fahrzeugposition im Raum

Das Fahrzeug bewegt sich im dreidimensionalen Raum (Abb. 5-7) einerseits entlang der horizontalen Linienführung, (x-Achse) auf Geraden, Übergangsbogen und Kreisbogen und andererseits entlang der vertikalen Linienführung (z-Achse) auf Geraden und Kreisbogen in Steigungen und Gefällen. Die dritte Dimension (y-Achse) entsteht aus der Zusammenführung von horizontaler und vertikaler zur räumlichen Linienführung. Dabei ist für die Fahrt vor allem die Querneigung von Bedeutung.

Abbildung 5-7: Fahrzeugachsen im Raum



Quelle: eigene Darstellung

Die momentane Lage des Fahrzeuges im Raum ist durch den Gierwinkel, den Wankwinkel und den Nickwinkel definiert.

Gierwinkel ψ

Der Gierwinkel ψ ist die Drehung des Fahrzeuges um die Vertikalachse z im Fahrzeugschwerpunkt (Abb. 5-7). Der Gierwinkel entsteht, wenn sich das Fahrzeug in einer Kurve anfängt zu drehen (siehe auch Kapitel 5.7.5).

Wankwinkel

Da der Schwerpunkt des Fahrzeuges nicht in der gleichen Ebene wie die Radachsen liegt, kommt es bei der Kurvenfahrt zu einem Wankwinkel (Abb. 5-8). Dieser bewirkt die Verformung der Radfedern, die kurveninneren Federn werden stärker belastet als die äusseren. Dadurch entsteht ein Rückstellmoment, welches bei stationärer Kurvenfahrt im Gleichgewicht mit dem Wankmoment ist (Haken 2013). Wird aber das Lenkrad plötzlich stärker eingeschlagen wie z.B. beim Spurtyp Korrigieren, so kann dieses Gleichgewicht gestört werden und das Fahrzeug, vereinfacht gesagt, ins Schleudern kommen.

Abbildung 5-8: Wankwinkel und Wankmoment

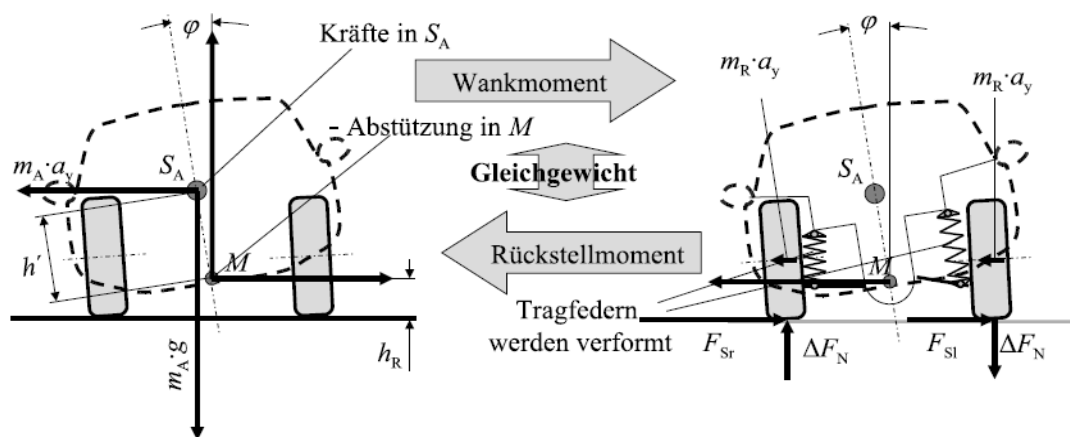


Bild 11.32: Ermittlung der dynamischen Radlasten bei Kurvenfahrt

Quelle: (Haken 2013)

Nickwinkel

Der Nickwinkel ist die Drehung des Fahrzeuges um die Querachse (Abb. 5-7, y -Achse). Ein Nicken des Fahrzeuges kann einerseits aufgrund der

Strassenoberfläche entstehen, z.B. beim Überfahren eines Vertikalversatzes (Schwelle, Berliner Kissen) oder bei starkem und abruptem Bremsen, wenn das Gewicht des Fahrzeuges stärker auf die vorderen Stossdämpfer wirkt (siehe auch Kapitel 5.7.5).

5.7.3. Bewegungsrichtung des Fahrzeuges in der Ebene (Einspurmodell)

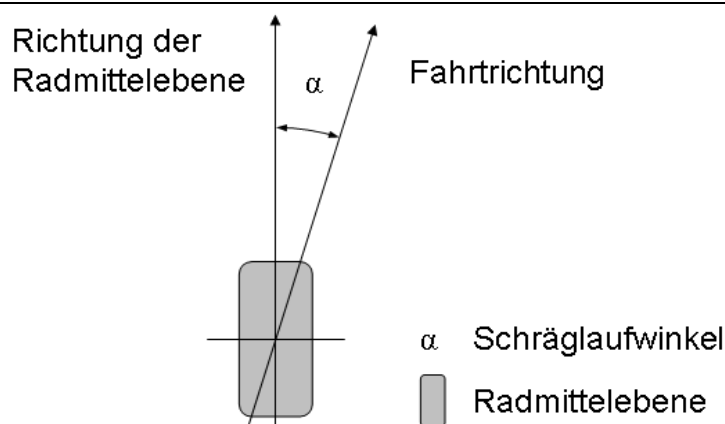
Für die weiteren Betrachtungen wird das Fahrzeug auf ein Einspurmodell reduziert, d.h., es wird davon ausgegangen, dass das in der Realität zweispurige und zweiachsige Fahrzeug nur eine Spur aufweist.

Die Position des Fahrzeuges in der Ebene wird durch die Ausrichtung der Räder und der Fahrzeuginnenachse sowie der Bewegungsrichtung des Fahrzeugschwerpunktes beschrieben.

Der Schräglaufwinkel α

Als Schräglaufwinkel bezeichnet man den Winkel zwischen der Bewegungsrichtung des Fahrzeugschwerpunktes und der Schnittgeraden von Radmittelebene und Fahrbahn (Abb. 5-9). Ein durchschnittlicher Fahrzeugreifen kann bei ca. 8° bis 12° die grösste Seitenführungskraft (Fliehkraft) aufnehmen (Trzesniowski 2010).

Abbildung 5-9: Schräglaufwinkel

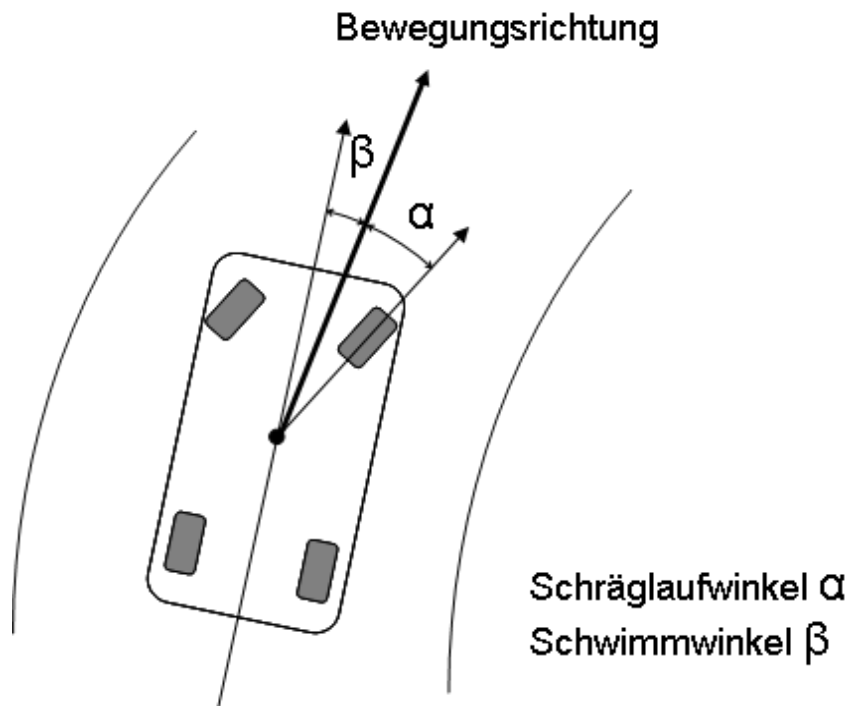


Quelle: eigene Darstellung nach Haken 2013

Der Schwimmwinkel β

Als Schwimmwinkel wird der Winkel zwischen der Bewegungsrichtung des Fahrzeugschwerpunktes und der Fahrzeuginnenachse bezeichnet (Abb. 5-10). Bis ca. 5° ist eine stabile Fahrt möglich (Breuer, Bill 2006).

Abbildung 5-10: Schwimmwinkel

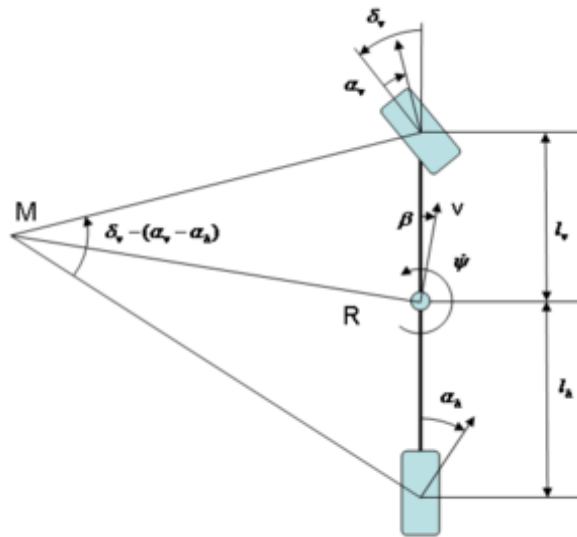


Quelle: eigene Darstellung nach Haken 2013

Lenkwinkel δ

Der Lenkwinkel δ , definiert als der mittlere Radlenkwinkel der gelenkten Achse, setzt sich zusammen aus dem Ackermann-Winkel δ_A und der Differenz der Schräglaufwinkel α_v und α_h der beiden Räder.

Der Ackermannwinkel δ_A ist der Winkel zwischen den beiden Verbindungsgeraden zwischen Momentanpol (momentanes Drehzentrum des Fahrzeuges während der Kurvenfahrt) und Vorder- resp. Hinterachse (Abb. 11). Er wird definiert als $\delta_A = l/R$ mit l = Radstand (Abstand zwischen Vorder- und Hinterachse) und R = Kurvenradius.

Abbildung 5-11: Lenkwinkel

M = Momentanpol

δ_A = Ackermannwinkel = l/R

ψ = Gierwinkel

β = Schwimmwinkel

α = Schräglaufwinkel (Vorder- und Hinterrad)

l = Radabstand zwischen Vorder- und Hinterachse

R = Kurvenradius

V = Geschwindigkeit des Fahrzeuges

Quelle: (Haken 2013)

Betrachtet man ein Fahrzeug als Einspurmodell, so sind die Schräglaufwinkel der beiden Räder als

$$\alpha_v = \delta - \frac{l_v}{R} - \beta \quad \text{und} \quad \alpha_h \approx \frac{l_h}{R} - \beta \quad \text{definiert.}$$

Werden die beiden Gleichungen subtrahiert, entsteht für den Lenkwinkel δ :

$$\delta \approx \frac{l_v}{R} + \frac{l_h}{R} + \alpha_v - \alpha_h \approx \frac{l}{R} + \Delta\alpha \approx \delta_A + \Delta\alpha$$

5.7.4. Fahrwiderstände

Um ein Fahrzeug zu bewegen, müssen verschiedene Widerstände überwunden werden. Klassisch werden sie aufgeteilt in Rad-, Luft-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstand. Für die vorliegende Arbeit ist v.a. der Radwiderstand von Bedeutung.

Haftreibung

Beim Haftreibungsverlust ist zwischen der Fahrbahn und den Reifen kein genügender Kraftreibungsschluss mehr vorhanden, der Antrieb oder die Bremskraft kann nicht mehr übertragen werden. In der Fahrmechanik wird unterschieden zwischen Haftreibung in tangentialer Richtung und solcher in radialer Richtung. Gleiten in tangentialer Richtung tritt so lange nicht ein, wie die untenstehende Gleichung eingehalten wird:

$$F_G \cdot f_L(v) + F_L(v) \geq F_G \cdot \frac{i}{100} + \frac{F_G \cdot a}{g}$$

F_G Gewichtskraft [N]

F_L Luftwiderstandskraft, geschwindigkeitsabhängig [N]

f_L tangentialer Reibungsanteil [-]

g Erdbeschleunigung [m/s²]

a Beschleunigung/Verzögerung [m/s²]

i Längsneigung [%]

Schlupf λ

Der Schlupf bezeichnet die Differenz der Radumfangsgeschwindigkeit und der Geschwindigkeit des Fahrzeuges. Es wird zwischen Antriebs- und Bremsschlupf unterschieden. Bei Ersterem drehen die Räder schneller als das Fahrzeug selbst fährt, beim Zweiten drehen sich die Räder langsamer. Die beiden Extremfälle sind in Tabelle 5-6 dargestellt.

Tabelle 5-6: Schlupf

	Antriebsschlupf	Bremsschlupf
0% Schlupf	Radumfangsgeschwindigkeit ist gleich der Fahrgeschwindigkeit	
100% Schlupf	durchdrehendes Rad bei stehendem Fahrzeug	blockiertes Rad bei Vollbremsung
	$\lambda_A = \frac{V_A - V_x}{V_A} [\%]$	$\lambda_B = \frac{V_x - V_A}{V_x} [\%]$
	mit $V_A =$ Radumfangsgeschwindigkeit $V_x =$ Fahrgeschwindigkeit	

Quelle: (Haken 2013)

Der Kammsche Kreis

Die Theorie des Kammschen Kreises (Abb. 5-12) geht davon aus, dass sich die Resultierende aus tangentialer (Längskraft) und radialer Kraft (Fliehkraft) zusammensetzt und die maximal vorhandene Reibungskraft nicht übersteigen kann (Haken 2013). Würde die Resultierende aus dem Kreis herausragen, so würde das bedeuten, dass die Haftungsgrenze überschritten ist und das Fahrzeug gleitet. Je mehr Reibung also beansprucht werden muss, um das Fahrzeug in der Kurvenbahn zu halten, desto weniger Kraft kann in Längsrichtung zum Bremsen aufgenommen werden und umgekehrt.

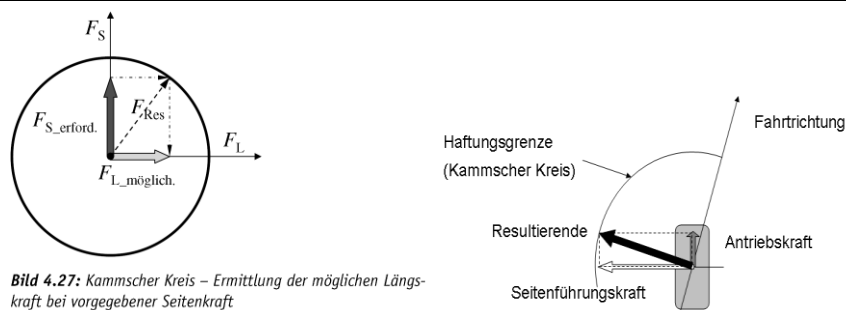
Abbildung 5-12: Kammscher Kreis

Bild 4.27: Kammscher Kreis – Ermittlung der möglichen Längskraft bei vorgegebener Seitenkraft

Quelle links: Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik (Haken 2013)

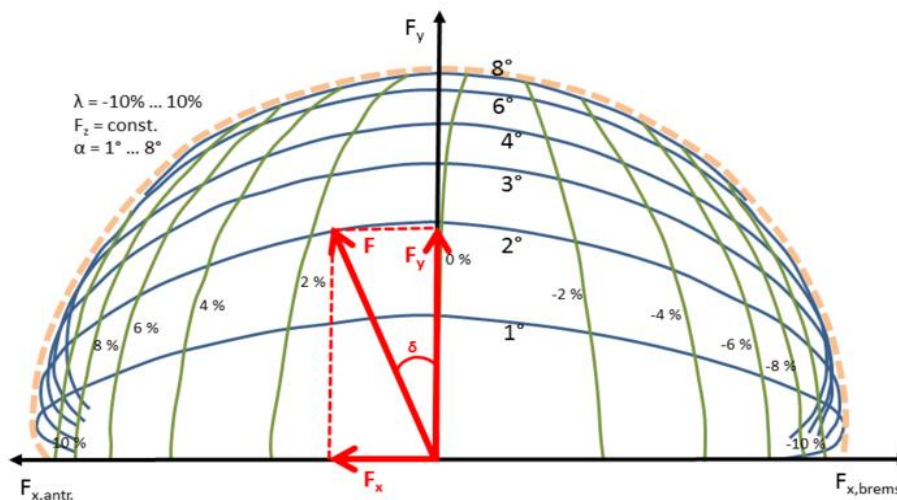
rechts: eigene Darstellung

Die Krepelsche Reibungsellipse

Anders als beim Kammschen Kreis geht das Modell der Krepelschen Reibungsellipse (Abb. 5-13) davon aus, dass die Kräfte, die aufgenommen werden können, richtungsabhängig sind. Ursachen dafür sind das Reifenprofil und die seitliche Verformbarkeit des Reifens bei hohen Querkraften. Als Näherung wird angenommen, dass die maximale Kraft in Querrichtung $max f_R$ ca. 92.5% der Kraft f_L in Längsrichtung entspricht (Spacek 2008).

$$max f_R = 0.925 \cdot f_L$$

Abbildung 5-13: Krepelsche Reibungsellipse

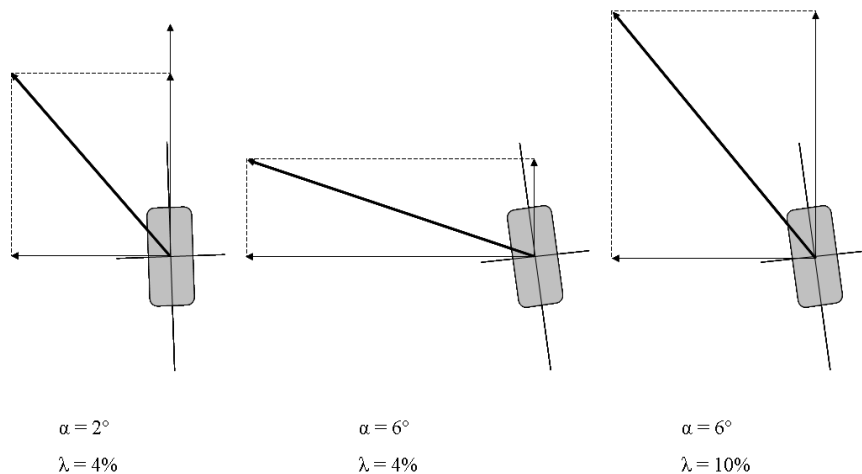


Quelle: (Heissing, Ersoy 2008),

Darstellung: de.wikipedia.org/wiki/Krepelsche_Reibungsellipse, Zugriff am 12.11.2014

Je nach Schräglaufwinkel der Räder und Schlupf ergibt sich eine andere Ellipse für die Haftgrenze. Je grösser der Schlupf λ bei gleichbleibendem Schräglaufwinkel α ist, desto kleiner ist die Seitenführungskraft, die aufgenommen werden kann. Je grösser der Schräglaufwinkel bei gleichbleibendem Schlupf ist, desto kleiner ist die maximal übertragbare Längskraft.

Die folgende Abbildung (Abb. 5-14) zeigt verschiedene Resultierende aus Längs- und Querkraft bei verschiedenen Schräglaufwinkeln und Schlupf.

Abbildung 5-14: Resultierende bei Schräglaufwinkel α und Schlupf λ 

Quelle: eigene Darstellung

Kurvenwiderstand

Das Gleiten in radialer Richtung ist abhängig vom Kurvenradius R , der Querneigung q und der Geschwindigkeit v . Solange die untenstehende Gleichung erfüllt ist, bewegt sich das Fahrzeug entlang der Kurvenbahn.

$$F_G \cdot \cos \alpha \cdot f_R(v) + Z \cdot \sin \alpha \cdot f_R(v) \geq Z \cdot \cos \alpha - F_G \cdot \sin \alpha$$

$$Z = m \cdot v^2 / R \quad (\text{Fliehkraft})$$

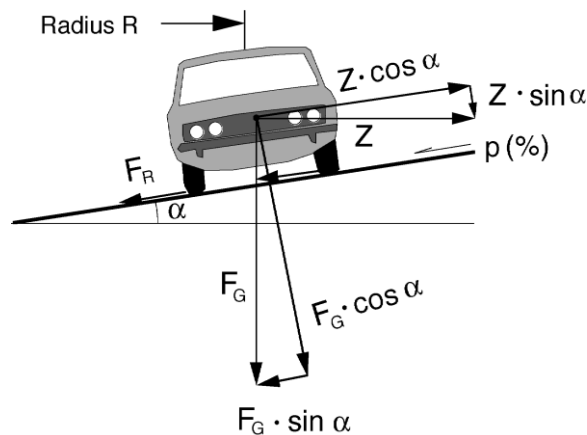
$$F_G = m \cdot g \quad (\text{Gewichtskraft})$$

$$\tan \alpha \approx p$$

Als Näherung kann angenommen werden, dass das fahrdynamische Gleichgewicht mit der folgenden Formel erfüllt ist:

$$f_R + p = \frac{V^2}{127 \cdot R} \quad (V \text{ in km/h})$$

Die Abbildung 5-15 zeigt das Kräftegleichgewicht bei der Kurvenfahrt.

Abbildung 5-15: Seitenführungs- bzw. Reibungskraft

Quelle: (Spacek 2008)

Für die Bestimmung der radialen Reibungskraft kann die folgende Formel verwendet werden:

$$F_R = F_G \cdot \cos \alpha \cdot f_R(v)$$

Die maximal mögliche Geschwindigkeit gemäss der obenstehenden Formeln ergibt sich als:

$$V_{zul} = \sqrt{127 \cdot R \cdot (zul f_R + p_{max})} \quad (V \text{ in km/h})$$

Querbeschleunigung

Ein Teil der Querbeschleunigung q kann durch das Quergefälle in der Kurve aufgenommen werden. Der für den Fahrzeuglenker als Fliehkraft spürbare Anteil muss durch die Reibungskräfte aufgenommen werden. (Spacek 2008).

$$q = \frac{v^2}{R} = g \cdot (f_R + p) = g \cdot f_R + g \cdot p \quad [\text{m/s}^2]$$

Die gesamte Querbeschleunigung q_{tot} setzt sich somit aus einem vom Quergefälle in der Kurve (p_K) kompensierten Teil q_p und einem nicht kompensierbaren, für den Fahrer spürbaren Anteil $q_{spür}$ zusammen.

5.7.5. Längs- und Querdynamik

Die physikalischen Ursachen der Unfälle aufgrund von Lenkfehlern oder Haftreibungsverlust sind im folgenden Kapitel dargestellt.

Fahrstabilitätsbetrachtung beim Bremsen

In Abbildung 5-14 ist dargestellt, was geschieht, wenn beim Bremsen eine seitliche Kraft wie z.B. die Querneigung, auf das Fahrzeug wirkt. Durch starkes Abbremsen kann das Hinterrad blockiert werden (5-16). Die rutschenden Hinterräder können keine seitliche Kraft mehr aufnehmen, diese wirkt nur noch auf den Vorderrädern. Dadurch verstärken sich der Gierwinkel und damit auch der Schräglaufwinkel sehr schnell, das Fahrzeug schleudert.

Abbildung 5-16: Fahrstabilität beim Bremsen

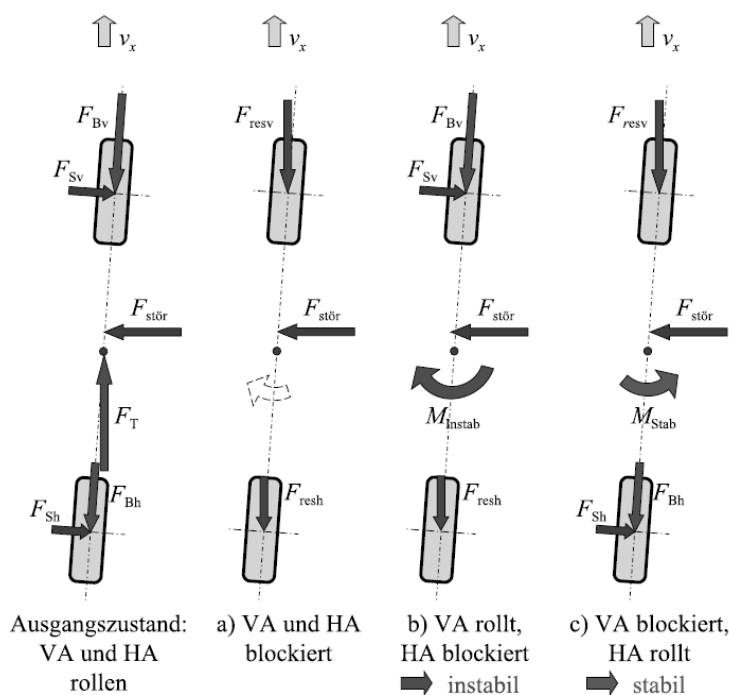


Bild 11.8: Fahrstabilitätsbetrachtung beim Bremsen mittels Ein-Spur-Modells

VA = Vorderachse, HA = Hinterachse

Quelle: (Haken 2013)

Eigenlenkverhalten

Beim Eigenlenkverhalten wird der Lenkwinkel, den das Lenkrad bei der Kurvenfahrt einnehmen muss, mit dem Ackermann-Lenkwinkel, der von der Distanz zwischen den Rädern und dem Radius der gefahrenen Kurve im Fahrzeugschwerpunkt abhängig ist, verglichen (Schramm 2005).

Die beiden instabilen Fahrzustände Unter- und Übersteuern sind eine Folge von zu hohen Geschwindigkeiten und zu starken Lenkmanövern (Tab. 5-7).

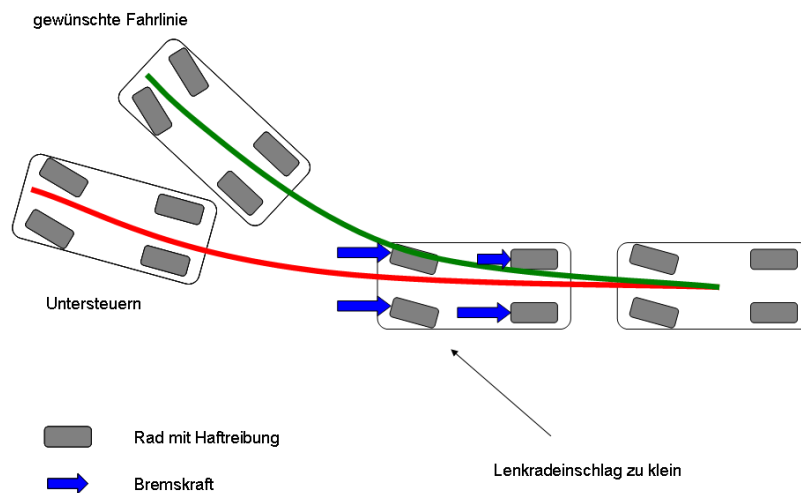
Tabelle 5-7: Schräglaufwinkel und Unter- und Übersteuern

Vorgang	$\Delta\alpha$	Folge
Untersteuern	$\Delta\alpha > 0$ $\alpha_{\text{Vorderräder}} \gg \alpha_{\text{Hinterräder}}$	Das Fahrzeug "schiebt" über die Vorderräder nach aussen
Übersteuern	$\Delta\alpha < 0$ $\alpha_{\text{Vorderräder}} \ll \alpha_{\text{Hinterräder}}$	Heck des Fahrzeuges bricht aus, Fahrzeug schleudert in der Kurve nach aussen

Quelle: (Haken 2013)

Beim Untersteuern (Abb. 5-17) ist der Lenkradeinschlag zu klein, das Fahrzeug fährt einen grösseren Radius als er dem Kurvenverlauf entsprechen würde. Die Hinterräder behalten Haftreibung.

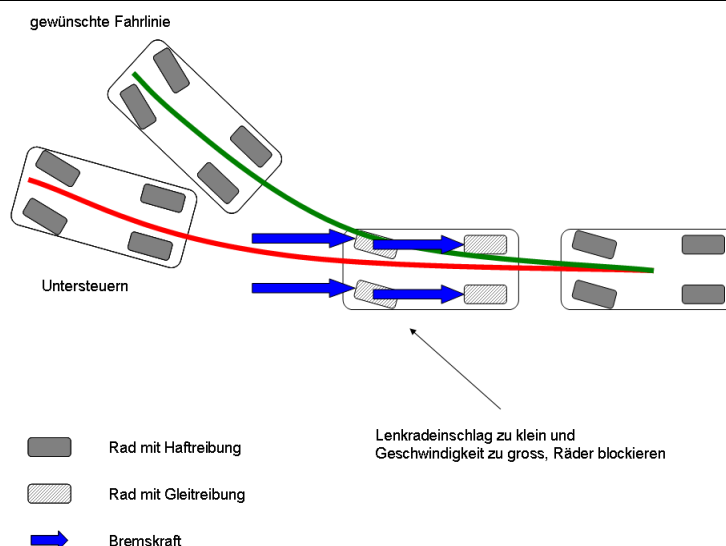
Abbildung 5-17: Untersteuern



Quelle: eigene Darstellung nach www.conti-online.com/www/automotive_de_de/themes/passenger_cars/chassis_safety/ved/ebs_family_de.html?page=3, Zugriff am 12.11.2014

Wenn bei zu geringem Lenkradeinschlag und hoher Geschwindigkeit sehr stark abgebremst wird, könnten die Räder blockieren und ihre Haftreibung verlieren. Das Fahrzeug gleitet entlang seiner momentanen Fahrlinie geradeaus weiter (Abb. 5-18).

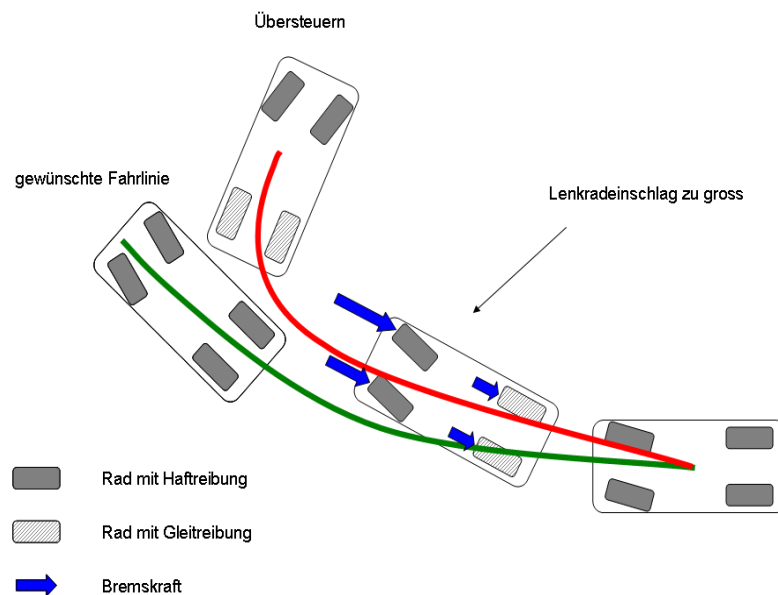
Abbildung 5-18: Untersteuern, Gleiten



Quelle: eigene Darstellung nach www.conti-online.com/www/automotive_de_de/themes/passenger_cars/chassis_safety/ved/ebs_family_de.html?page=3, Zugriff am 12.11.2014

Beim Übersteuern ist der Lenkradeinschlag grösser als für die Kurvenfahrt notwendig (Abb. 5-19). Durch plötzliches Bremsen während der Kurvenfahrt wird die Vorderachse stärker belastet, die Hinterachse wird entlastet und kann weniger Reibung aufnehmen. In der Folge verliert sie die Haftung und gleitet gegen die Strassenaussenseite, das Fahrzeug kommt ins Schleudern.

Abbildung 5-19: Übersteuern



Quelle: eigene Darstellung nach www.conti-online.com/www/automotive_de_de/themes/passenger_cars/chassis_safety/ved/ebs_family_de.html?page=3, Zugriff am 12.11.2014

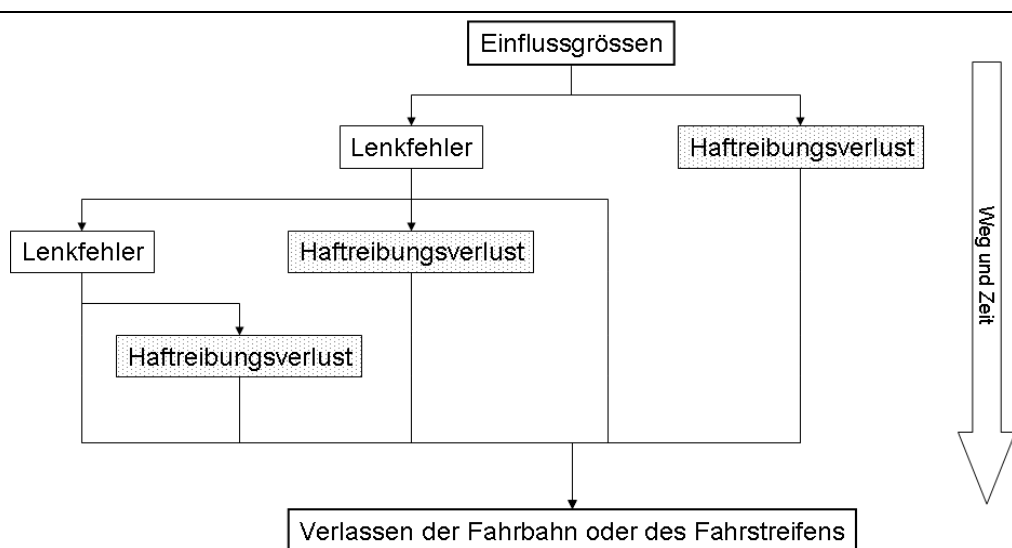
Eine Lenkradkorrektur (z.B. Gegenlenken) und veränderte Strassenbedingungen, wodurch ein oder mehrere Räder wieder Haftung haben, können das Fahrzeug von einem instabilen Zustand in den anderen wechseln lassen.

5.7.6. Physikalische Versagensart

Um den Kommandierten Ausfall (menschliches Versagen, vgl. Kapitel 5.6) für den Fehlerbaum genauer zu beschreiben, werden im folgenden Kapitel die vorgängig betrachteten fahrdynamischen Vorgänge in einen Zusammenhang mit den möglichen Versagensarten gestellt.

Ausgehend von hier nicht näher definierten Einflussgrößen findet eine bestimmte Art von Versagen statt. Es ereignet sich entweder ein Lenkfehler oder die Haftreibung reicht nicht mehr aus, um das Fahrzeug in der gewünschten Spur zu halten. Die Darstellung in Abbildung 5-20 geht von idealisierten, homogenen Bedingungen aus und es wird angenommen, dass am Ende ein Versagen eintritt.

Abbildung 5-20: Versagensart und Folgen



Quelle: eigene Darstellung

Ein Lenkfehler kann durch eine Korrektur zu einem Haftreibungsverlust oder zu einem weiteren Lenkfehler führen. Die Folge bei beiden Versagensarten ist das Verlassen der Fahrbahn (d.h. der Strasse insgesamt) oder des Fahrstreifens (d.h. der Spur in Fahrtrichtung), entweder Richtung Kurveninnenseite oder Richtung Kurvenaussenseite. Das Verlassen kann geradlinig oder als Schleudern (mit Drehung um die vertikale oder horizontale Fahrzeugachse) geschehen.

Ein Lenkfehler kann entstehen, wenn - im Extremfall - gar nicht gelenkt wird und das Fahrzeug in der eingeschlagenen Richtung geradeaus weiterfährt (z.B. Suizid). Ein Lenkfehler kann aber auch durch falsche Wahrnehmung der Kurve geschehen. In diesem Fall ist anzunehmen, dass der Lenker eine

Korrektur einleiten wird, sobald er bemerkt, dass seine momentane Fahrlinie nicht geeignet ist. Die Korrektur kann zu gering oder falsch sein und das Fahrzeug verlässt die Fahrbahn trotzdem. Die Korrektur kann grundsätzlich richtig, aber zu abrupt sein, und die Reifen verlieren in der Folge die vorhandene Haftreibung und das Fahrzeug kann ins Rutschen kommen. Oder aber die Haftreibung wird aufgrund umgelagerter Kräfte zu gross und das Fahrzeug gerät ins Schleudern. In der untenstehenden Tabelle (Tab. 5-8) sind die verschiedenen physikalischen Auslöser von Unfällen zusammengefasst.

Tabelle 5-8: Physikalische Auslöser von Unfällen

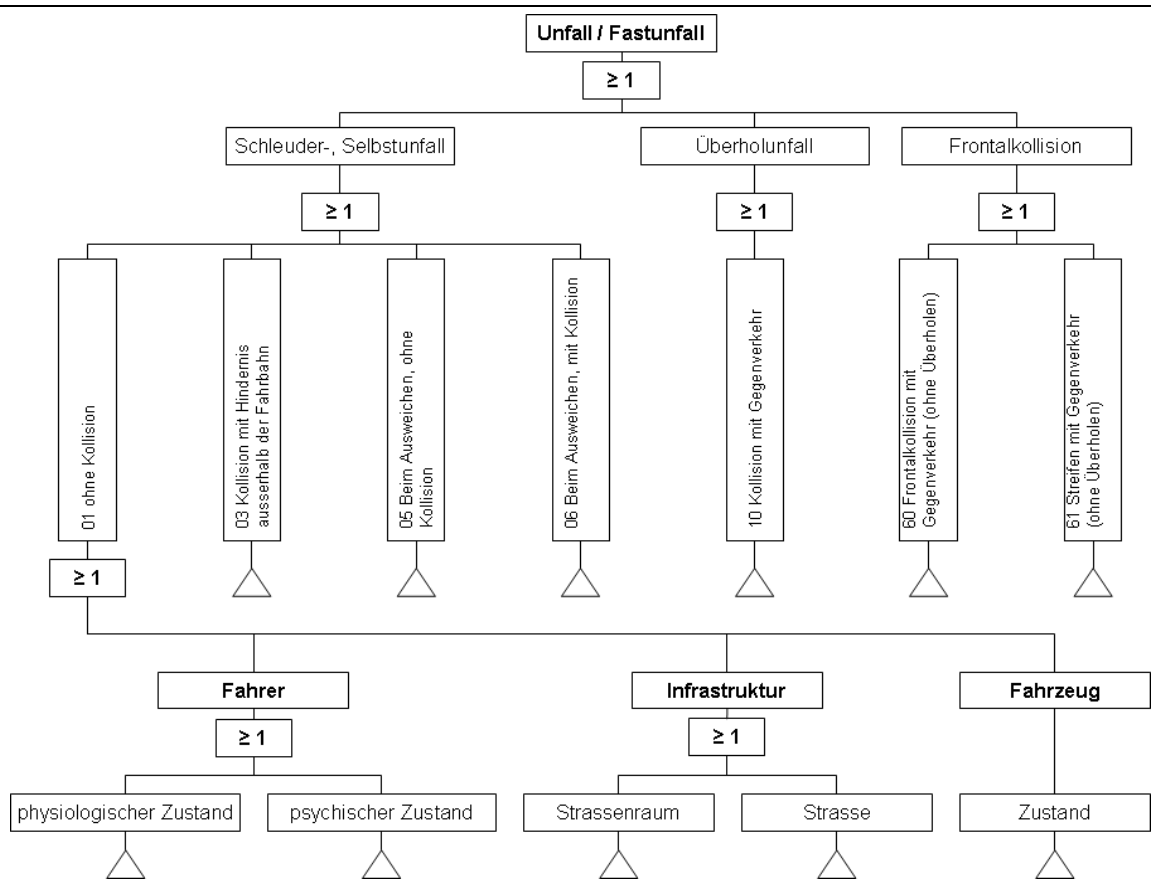
Versagensart	Problem	Folge	Fahrmechanische Ursache
Lenkfehler	Keine Lenkradbewegung	Verlassen der Fahrbahn in tangentialer Kurvenrichtung	Lenkwinkel δ nicht vorhanden
	Zu starke Lenkradbewegung	Verlassen der Fahrbahn in Fahrtrichtung (geradlinig)	Übersteuern
		Schleudern in Richtung Kurvenaussenseite	Übersteuern, Wankmoment zu gross
		Schleudern in Richtung Kurveninnenseite	Gierwinkel zu gross
Haftreibungsverlust	Gleiten in tangentialer Richtung	Verlassen der Fahrbahn in tangentialer Kurvenrichtung	Untersteuern
	Gleiten in radialer Richtung (Fliehkraft)	Verlassen der Fahrbahn in radialer Kurvenrichtung	Fliehkraft zu gross

Quelle: eigene Darstellung

5.8. Aufstellung des Fehlerbaums

Die Abbildung 5-21 zeigt eine Übersicht des Fehlerbaumes mit den betrachteten Unfalltypen aus Tabelle 5-4. Damit ein Unfall oder Fastunfall passiert, muss die Wahrscheinlichkeit, dass einer der Unfalltypen geschieht, jeweils grösser oder gleich eins sein³⁵. Wenn nun z.B. ein Unfalltyp 01 stattfindet, muss wiederum die Wahrscheinlichkeit grösser oder gleich eins sein, dass mindestens eine Unfallursache beim Fahrer oder bei der Infrastruktur oder beim Fahrzeug vorliegt.

Abbildung 5-21: Fehlerbaum Übersicht



Quelle: eigene Darstellung

³⁵ In der Fehlerbaumanalyse wird der Operator „ ≥ 1 “ verwendet, um anzuzeigen, dass mindestens eine Versagensart auftreten muss, damit ein Unfall geschieht. Es können aber auch gleichzeitig mehrere Versagensarten auftreten.

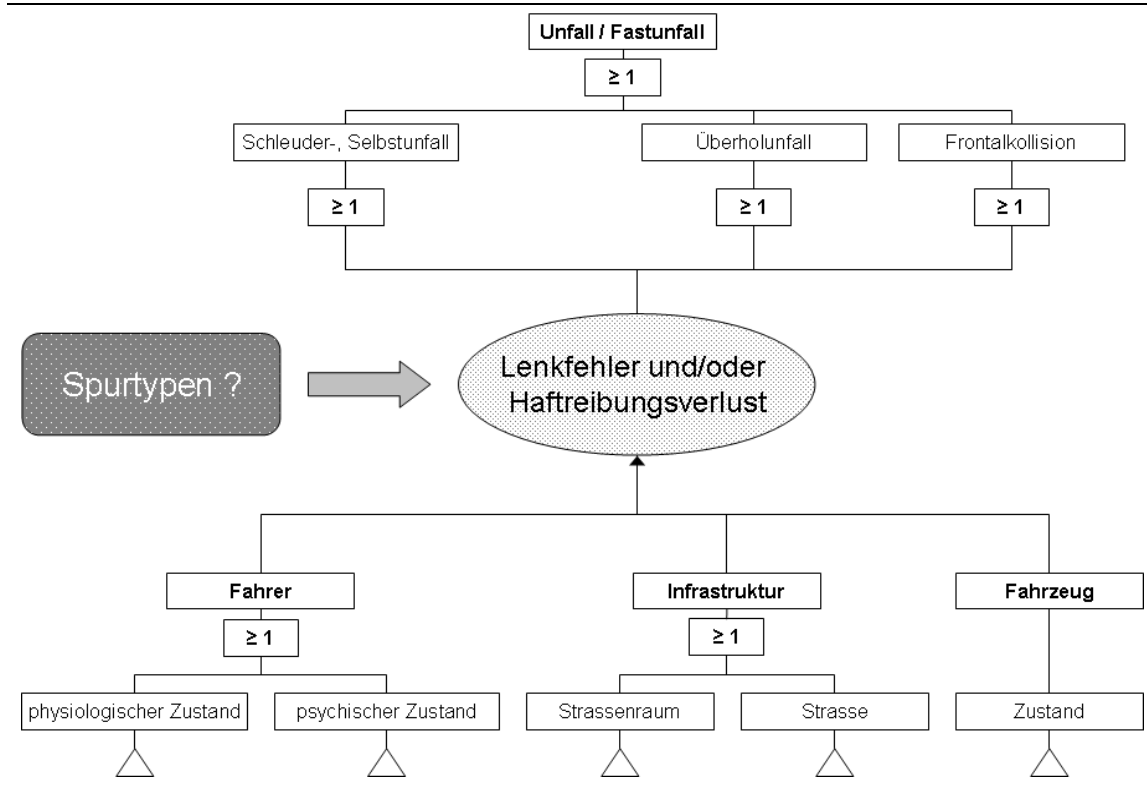
Die Abbildung 5-22 zeigt einen Fehlerbaum für den Unfalltyp „Schleuder-/Selbstunfall, ohne Kollision“. Die weiteren Fehlerbäume für die übrigen Unfalltypen sind im Anhang A zu finden.

5.9. Auswertung des Fehlerbaums und Ergebnisdiskussion

Die hier durchgeführte Fehlerbaumanalyse hat gezeigt, dass grundsätzlich bei allen betrachteten Unfalltypen sehr viele verschiedene Einflussfaktoren oder Kombinationen dieser Faktoren als Ursachen eines Unfalls in Frage kommen.

Ein Einflussfaktor kann nicht uneindeutig einem Unfalltyp zugeordnet werden. Weiter ist es mit der hier durchgeführten Fehlerbaumanalyse und den Kenntnissen aus der Literaturrecherche nicht möglich, messbare Abhängigkeiten der einzelnen Faktoren untereinander oder Gewichtungen und Häufigkeiten in allgemeiner Form darzustellen. Am Ende sind jedoch alle Unfälle auf die zwei Versagensarten des Lenkfehlers oder des Haftreibungsverlustes zurückzuführen (Abb. 5-20).

Um einen Zusammenhang zwischen dem Spurverhalten und den Unfallursachen zu finden, wird mit den in Kapitel 5.7 definierten fahrdynamischen Vorgängen versucht, einen Zusammenhang zwischen den Versagensarten und deren Auftreten bei bestimmten Spurtypen zu finden (Abb. 5-23). Weiter sollen auch die Krümmungsrichtung der Kurve sowie der Kurvenort in die Überlegungen miteinbezogen werden. Für die einzelnen Unfalltypen werden anschliessend die gleichen Überlegungen gemacht.

Abbildung 5-23: Fehlerbaum mit Blackbox “Lenkfehler/Haftreibungsverlust”

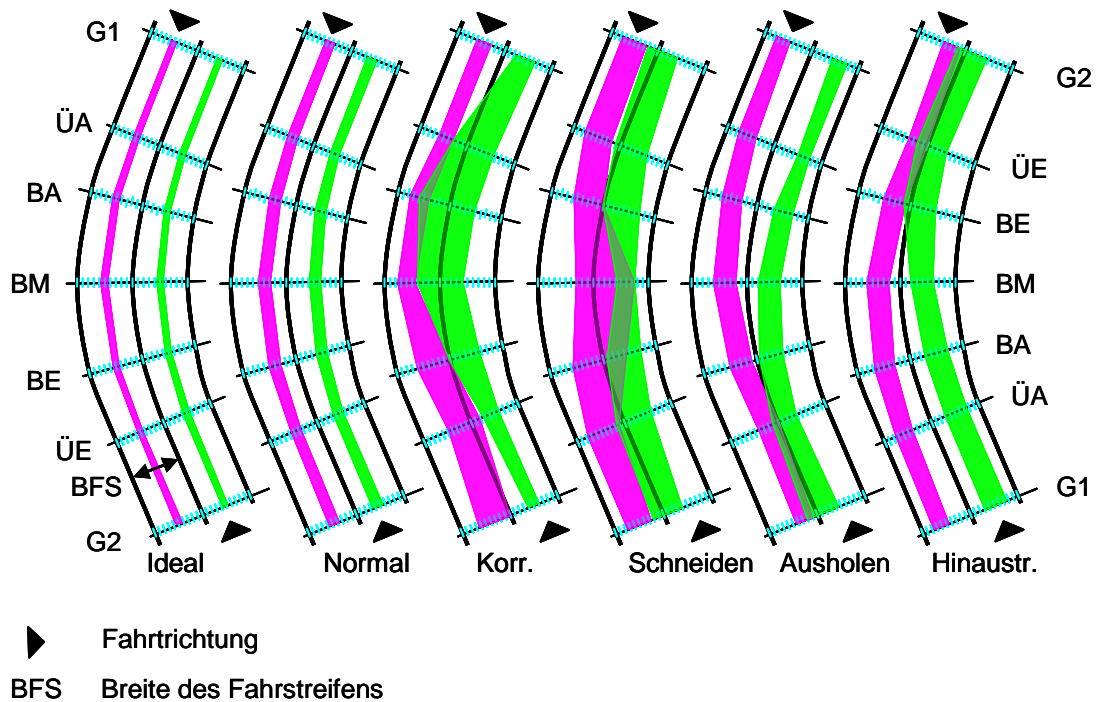
Quelle: eigene Darstellung

5.10. Physikalische Versagensart im Zusammenhang mit Spur- und Unfalltypen

5.10.1. Spurtypen

Die Spurtypen wurden bereits in einem früheren Forschungsauftrag am IVT im Zusammenhang mit der Entwicklung der Messpfosten definiert (Scheifele, Spacek 1992; Spacek 1998). Es werden sechs verschiedene Typen unterschieden (Abb. 5-24). Es wird jeweils die mögliche Lage der Fahrzeugachse in Prozent der Fahrstreifenbreite je Kurvenhauptort dargestellt.

Abbildung 5-24: Spurtypen und mögliche Lage der Fahrzeugachse



Kurvenhauptpunkte:

- G1 = Gerade
- ÜA = Übergangsbogenanfang
- BA = Bogenanfang
- BM = Bogenmitte
- BE = Bogenende
- ÜE = Übergangsbogenende
- G2 = Gerade

Quelle: (Spacek 1998), eigene Darstellung

Beim Spurtypen „Ideal“ folgt die Fahrzeugachse der Fahrstreifenmitte in einem Toleranzbereich von $\pm 5\%$. Der Spurtyp „Normal“ folgt bereits nicht mehr exakt der Fahrstreifenmitte und hat eine Bandbreite von $\pm 10\%$ der Fahrstreifenbreite mit leichtem Schneiden in der Kurvenmitte. Der Spurtyp „Korrigieren“ hat in der zweiten Kurvenhälfte eine breitere Fläche zur Verfügung, die aufgrund einer Lenkkorrektur entsteht. Beim „Schneiden“ verlagert sich die Fahrzeugachse im Bereich des Kurvenmittelpunktes stark zum inneren Fahrstreifenrand hin, in Linkskurven sogar bis auf die Gegenfahrbahn. Beim „Ausholen“ versucht der Fahrzeuglenker durch das

Befahren der linken Hälfte der Fahrspur zu Beginn der Kurve einen grösseren Kurvenradius zu fahren und die Kurvenfahrt früher zu beenden, als es die trassierte Kurve vorgibt. Beim Spurtyp „Hinaustragen“ wird der kleinste Kurvenradius nach dem eigentlichen Kurvenradius gefahren.

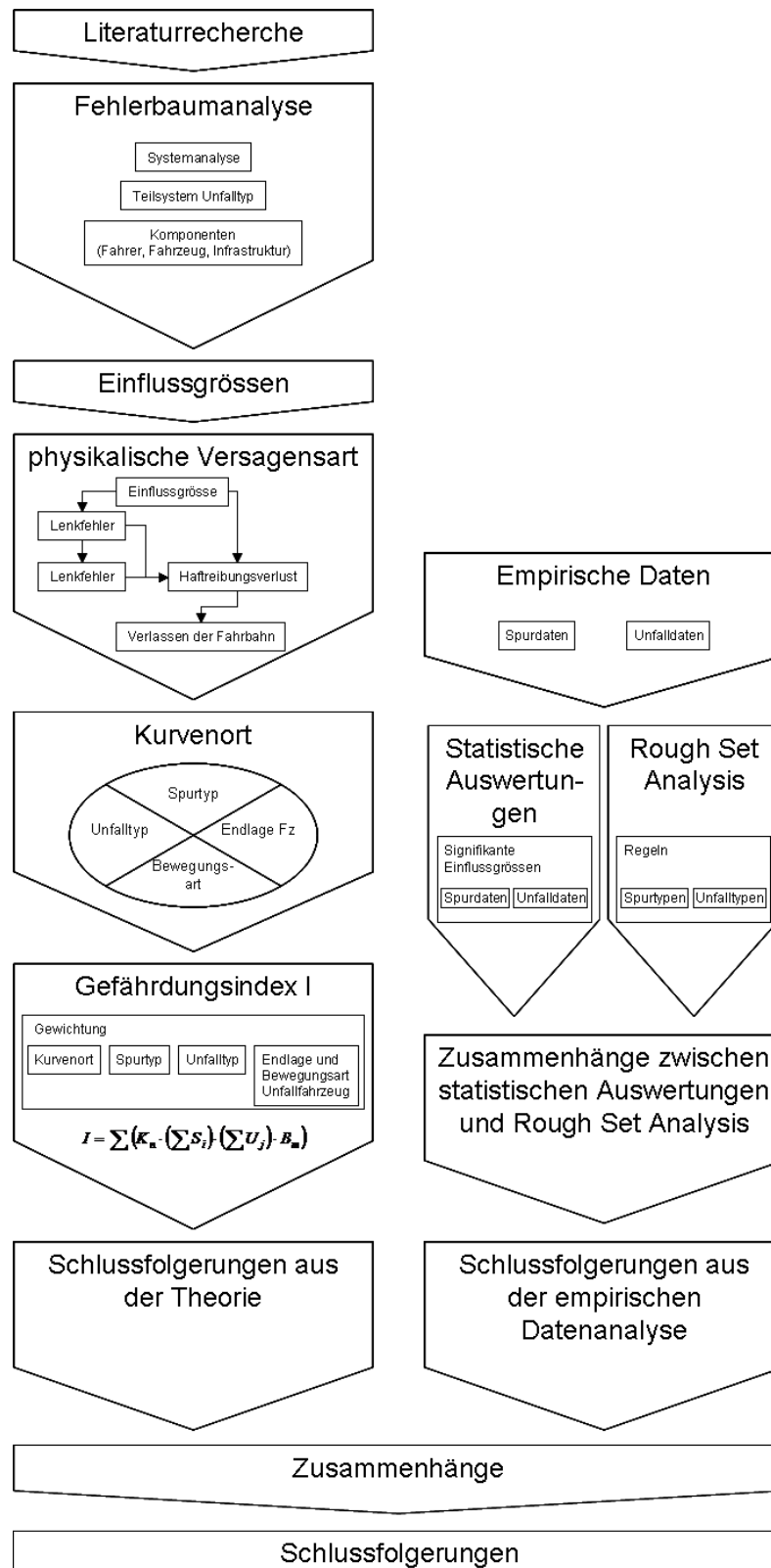
Die Wahl eines Spurtyps kann bewusst geschehen oder aufgrund der momentanen Geschwindigkeit und physikalischer Folgen unbewusst erfolgen.

5.10.2. Versagensart und Spurtyp

In den vorangehenden Kapiteln wurden ausgehend von den Unfalltypen Einflussfaktoren bestimmt, die zu diesen Unfalltypen führen könnten. Diese Faktoren wurden unterteilt in die Teilsysteme Fahrer, Fahrzeug und verhaltensrelevante Infrastruktureigenschaften. In einem weiteren Schritt wurden zwei grundsätzliche Versagensarten definiert, die zu einem der hier betrachteten Unfalltypen führen können. Nachfolgend werden nun den einzelnen Spurtypen Kurvenorte zugeordnet, in denen aufgrund der Eigenschaften der Spurtypen eine bestimmte Versagensart auftreten kann. Dann werden die Spurtypen den Versagensarten und den Kurvenbereichen zugeordnet. Parallel dazu wird definiert werden, welche Unfalltypen in welchen Kurvenbereichen auftreten können. Abschliessend werden die Spurtypen und die Unfalltypen in den Kurvenbereichen verglichen.

Die folgende Abbildung (Abb. 5-25) zeigt schematisch den Zusammenhang zwischen den theoretischen Überlegungen und den empirisch erhobenen Daten. Ausgehend von der System- und Fehlerbaumanalyse wurden die Einflussfaktoren der einzelnen Unfalltypen bestimmt. Diese Einflussfaktoren führen im Falle eines Unfalles oder Fastunfalles entweder zu einem Lenkfehler oder zu einem Haftreibungsverlust. Je nach Spurtyp können mögliche Auftretensorte der beiden Fehlerarten sowie deren Folgen analysiert werden. Die Folge eines Fehlers führt im Anschluss wieder zu einem möglichen Unfalltypen.

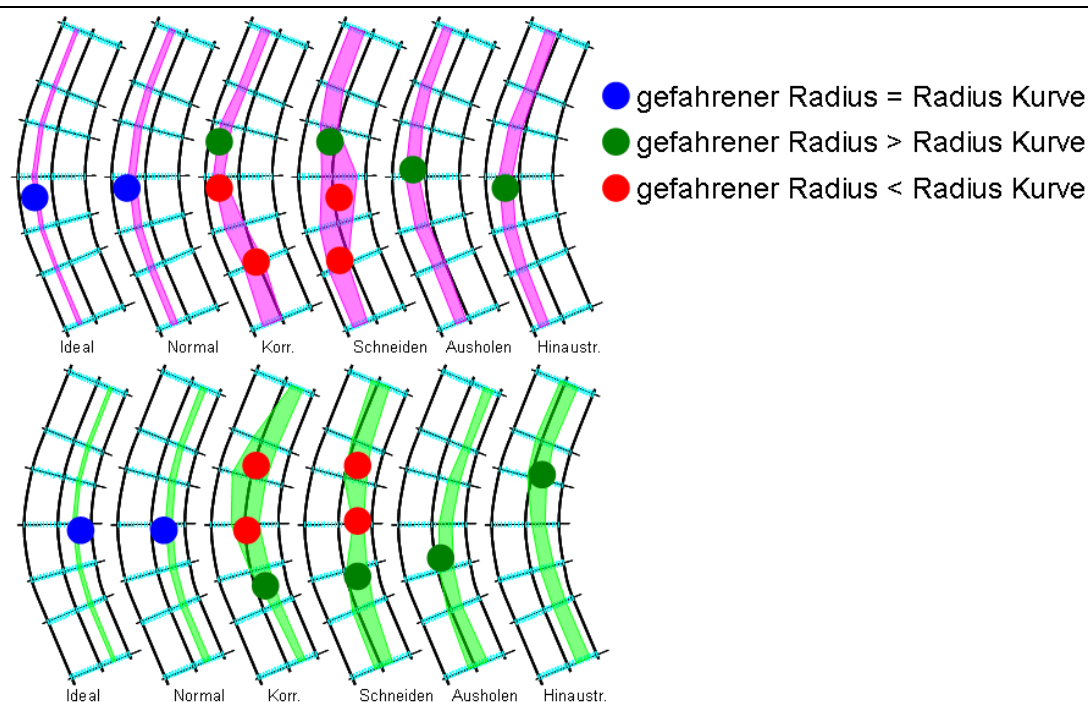
Abbildung 5-25: Modellvorstellung



Quelle: eigene Darstellung

Die folgende Abbildung (Abb. 5-26) zeigt die Kurvenbereiche, wo der gefahrene Radius nicht dem trassierten Kurvenradius entspricht. Wenn der gefahrene Radius grösser als der Kurvenradius ist, bedeutet dies, dass ein Lenker schneller fahren kann, als wenn er dem trassierten Radius folgen würde. Ist der gefahrene Radius kleiner als der trassierte, könnte das die Folge einer plötzlichen Lenkkorrektur sein, wie sie in den Spurtypen „Korrigieren, Ausholen oder Hinaustragen“ auftreten.

Abbildung 5-26: gefahrener Radius



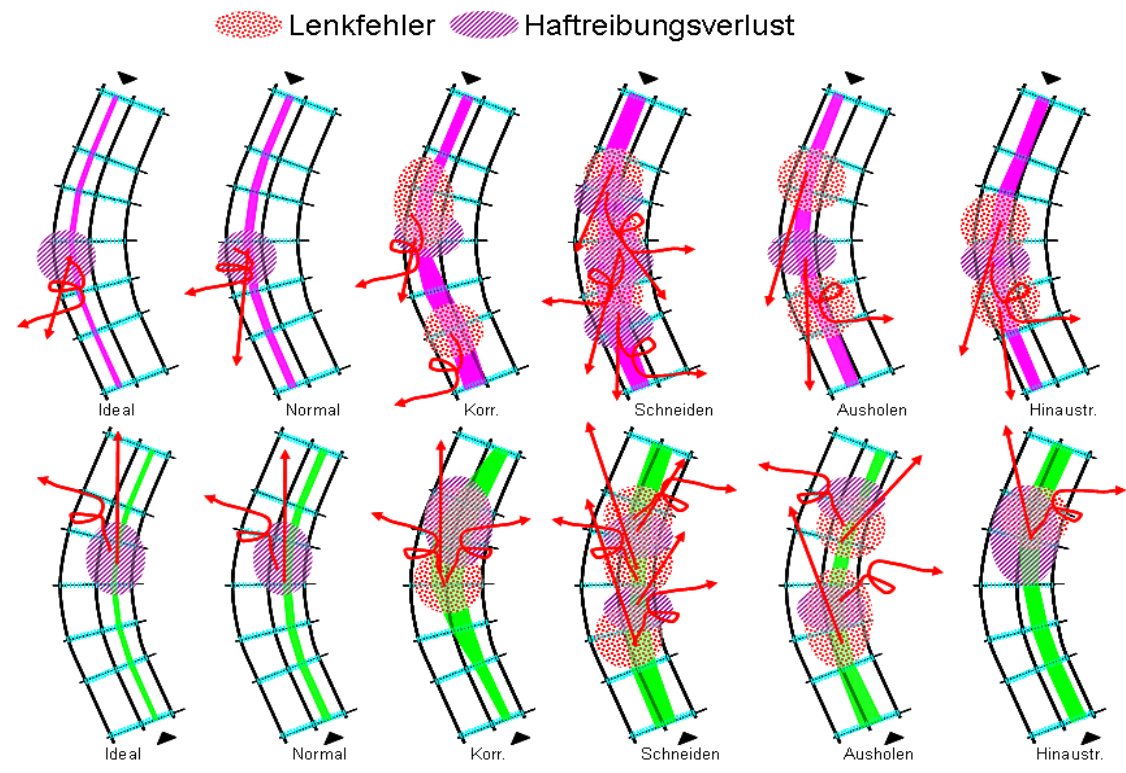
Quelle: eigene Darstellung (Linkskurve oben, Rechtskurve unten)

Bei grösseren gefahrenen Radien und damit höherer möglicher Geschwindigkeit steht weniger Haftreibung zur Verfügung (Lindenmann, Baumgartner et al. 2010). Ein Haftreibungsverlust könnte schneller auftreten. Durch eine plötzliche Lenkradbewegung federt das Auto auf der einen Seite stärker ein, die Haftung und damit die möglichen übertragbaren Kräfte in Längs- und Querrichtung nehmen ab und das Fahrzeug gerät in einen instabilen Zustand, infolge dessen Schleudern möglich wäre. Oder es entsteht durch das Einfedern auf der einen Seite ein Rückstellmoment und eine Wankbewegung auf die Gegenseite.

Je Spurtyp und Kurvenart kann zwischen den verschiedenen Kurvenhauptpunkten eine Aussage zu den Versagensarten gemacht werden. In Abbildung 5-27 sind die Bereiche markiert, wo Lenkfehler und Haftreibungsverlust auftreten können und die möglichen Richtungen der Bewegungsvektoren werden dargestellt. Gerade Pfeile sind immer tangential zur Spur, Pfeile mit angedeutetem Schleudern zeigen in Richtung der Endlage des Fahrzeuges nach dem Unfall.

Bei den beiden Spurtypen „Ideal“ und „Normal“ tritt als Versagen nur der Haftreibungsverlust auf. Ursache dafür ist stark überhöhte Geschwindigkeit und/oder starke Bremsung.

Abbildung 5-27: Lenkfehler und Haftreibungsverlust je Spurtyp

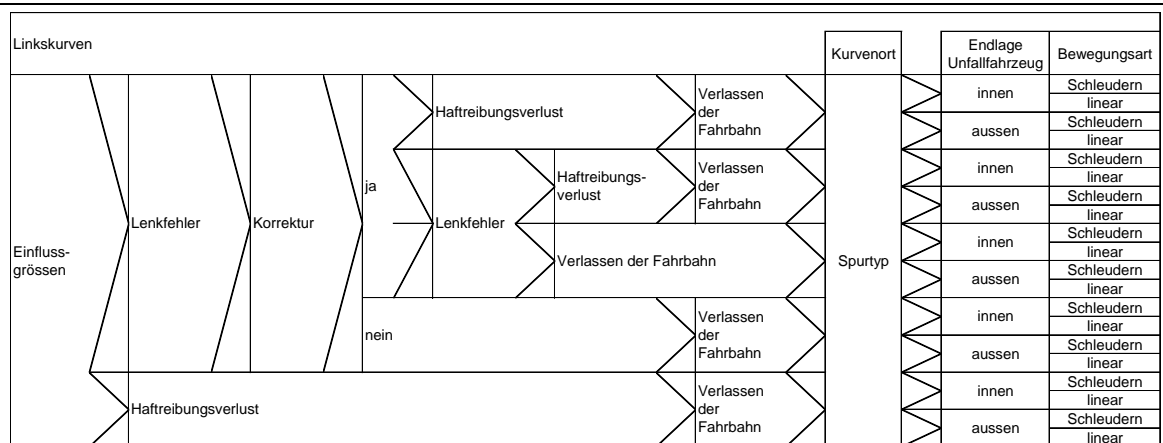


Quelle: eigene Darstellung

In den folgenden beiden Abbildungen (Abb. 5-28 und 5-29) sind die Spurtypen den beiden Ursachen Lenkfehler oder Haftreibungsverlust am jeweiligen Kurvenort zugeordnet. Es wird unterschieden, ob das Fahrzeug ins Schleudern gerät oder nicht und ob sich die Endlage des Unfallfahrzeuges im Kurveninnen- oder aussenbereich befindet.

Abbildung 5-28 zeigt die Versagensarten in der Linkskurve und Abbildung 5-29 in der Rechtskurve. Jedem Kurvenbereich zwischen den Kurvenhauptpunkten sind die möglichen Spurtypen zugeordnet, die zum entsprechenden Versagen führen können. Es zeigt sich, dass jeder Spurtyp in verschiedenen Bereichen einer Kurve zu verschiedenen Versagen führen kann. Die Kurvenbereiche mit der grössten Häufung möglicher Spurtypen liegen zwischen Bogenmitte (BM) und Übergangsbogenende (ÜE). In der Linkskurve sind tendenziell mehr Spurtypen in mehr Kurvenabschnitten zu finden als in der Rechtskurve.

Abbildung 5-28: Versagensarten in Linkskurven



	Kurvenort						Endlage Unfallfahrzeug	Bewegungsart
	ÜA-BA	BA-BM	BM-BE	BE-ÜE	ÜE-G			
Verlassen der Fahrbahn			H	SH		}	innen	Schleudern
				SH				linear
Verlassen der Fahrbahn			KSA	KAH		}	aussern	Schleudern
			KSA	KAH				linear
Verlassen der Fahrbahn			S	K		}	innen	Schleudern
				K				linear
Verlassen der Fahrbahn			KSA	AH		}	aussern	Schleudern
			KSA	H				linear
Verlassen der Fahrbahn			K			}	innen	Schleudern
			S	H				linear
Verlassen der Fahrbahn				A		}	aussern	Schleudern
				SAH				linear
Verlassen der Fahrbahn				A		}	innen	Schleudern
								linear
Verlassen der Fahrbahn		AH	AH			}	aussern	Schleudern
		KAH	AH	K				linear
Verlassen der Fahrbahn		S		H		}	innen	Schleudern
		S	S	KS				linear
Verlassen der Fahrbahn			INK			}	aussern	Schleudern
		A	INKAH	AH				linear

Kurvenhauptpunkte:

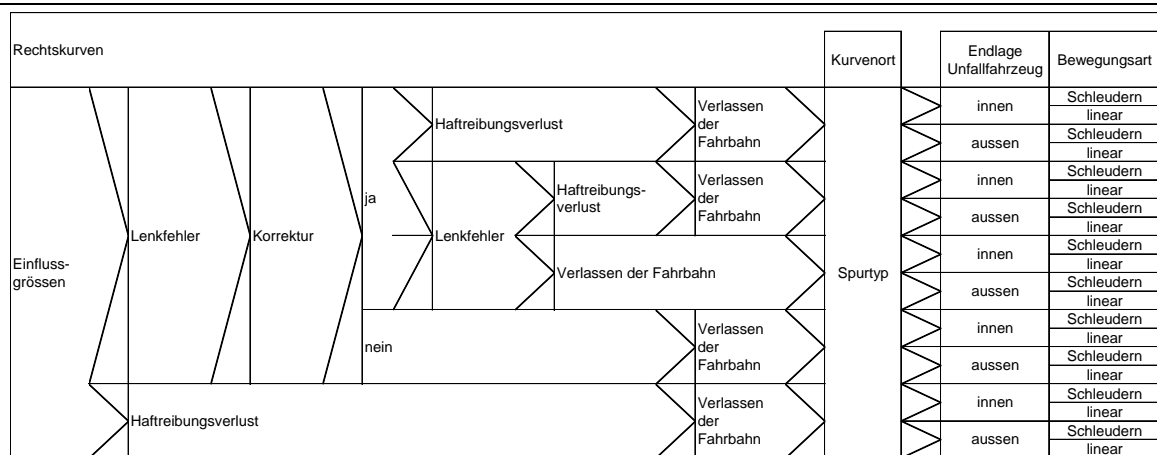
- ÜA = Übergangsbogenanfang
- BA = Bogenanfang
- BM = Bogenmitte
- BE = Bogenende
- ÜE = Übergangsbogenende

Spurtypen:

- I = Ideal
- N = Normal
- K = Korrigieren
- S = Schneiden
- A = Ausholen
- H = Hinaustragen

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 5-29: Versagensarten in Rechtskurven



	Kurvenort						Endlage Unfallfahrzeug	Bewegungsart
	ÜA-BA	BA-BM	BM-BE	BE-ÜE	ÜE-G			
Verlassen der Fahrbahn			A	K H		innen	Schleudern	
				K H			linear	
Verlassen der Fahrbahn			K S A	H		ausen	Schleudern	
			K				linear	
Verlassen der Fahrbahn			A	K S H		innen	Schleudern	
				K			linear	
Verlassen der Fahrbahn				K H		ausen	Schleudern	
				K			linear	
Verlassen der Fahrbahn			A	K S		innen	Schleudern	
				K			linear	
Verlassen der Fahrbahn			S	K A	H	ausen	Schleudern	
	A	K	K	H	S		linear	
Verlassen der Fahrbahn			S	K		innen	Schleudern	
			I N K				linear	
Verlassen der Fahrbahn		A	I N K A	S H		ausen	Schleudern	
							linear	

Kurvenhauptpunkte:

- ÜA = Übergangsbogenanfang
- BA = Bogenanfang
- BM = Bogenmitte
- BE = Bogenende
- ÜE = Übergangsbogenende

Spurtypen:

- I = Ideal
- N = Normal
- K = Korrigieren
- S = Schneiden
- A = Ausholen
- H = Hinaustragen

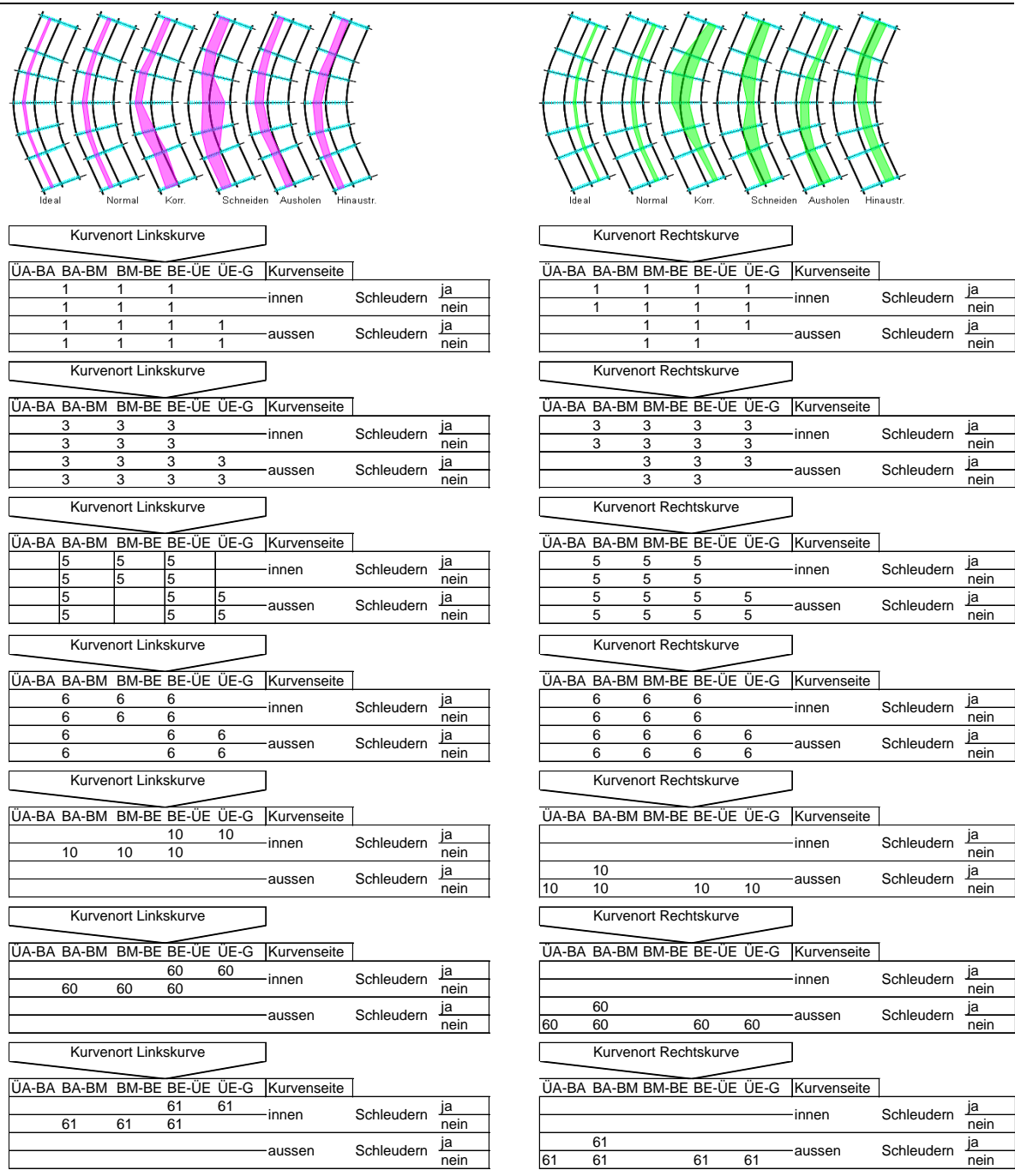
Quelle: eigene Darstellung

5.10.3. Versagensart und Unfalltyp

Die Zuordnung der einzelnen Unfalltypen zu den Kurvenbereichen und Spurtypen lässt sich nicht uneindeutig vornehmen, da in den polizeilichen UAPs³⁶ z. B. die Definition „Schleuder- oder Selbstunfall, ohne Kollision“ einerseits örtlich nicht näher beschrieben ist und andererseits bei verschiedenen Spurtypen auftreten kann. In Abbildung 5-30 wurden die Unfalltypen in den möglichen Kurvenbereichen, in denen sie auftreten können, definiert. Es zeigen sich gewisse Unterschiede bezüglich Unfalltyp und Kurvenbereich resp. Unfalltyp und Links- oder Rechtskurve. Beispielsweise können die Unfalltypen der Kategorie „Schleuder-/Selbstunfall“ (Typ 01 bis 06) generell an mehr Kurvenorten auftreten als die „Überholunfälle“ oder „Frontalkollisionen“ (60, 61). Weiter zeigt sich, dass die Kurvenrichtung für das Auftreten der Unfälle eine Rolle spielt. Z.B. treten in Linkskurven die Unfalltypen 1 und 3 am Kurvenende nur gegen die Kurvenaussenseite auf, in Rechtskurven hingegen auch gegen die Kurveninnenseite.

³⁶ UAP = Unfallaufnahmeprotokoll

Abbildung 5-30: Versagensart im Kurvenbereich und zugehöriger Unfalltyp



Die Zahlen 1, 3, 5, 6, 10, 60 und 61 entsprechen den Unfalltypen aus Kapitel 5.3

Quelle: eigene Darstellung

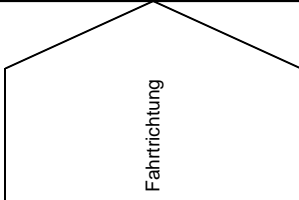
5.10.4. Spurtyp und Unfalltyp nach Lage Kurvenort

In Kapitel 5.10.2 und 5.10.3 wurden die Spurtypen und die Unfalltypen den einzelnen Kurvenbereichen zugeordnet. Bei beiden Darstellungen lassen sich keine eindeutigen Zuordnungen machen, wenn sie aber überlagert werden, lassen sich doch gewisse Trends erkennen (Abb. 5-31 und 5-32).

In der Linkskurve (Abb. 5-31) hat ein Unfall in Richtung Kurveninnenseite im Bereich des Bogenanfangs bis zur Bogenmitte (BM) als Ursache den Spurtyp „Schneiden“. Im Bereich Bogenende (BE) bis Übergangsbogenende (ÜE) können alle Unfalltypen auftreten. Im Bereich Bogenmitte (BM) bis Bogenende (BE) können alle Spurtypen bei einem Unfall mit Endlage des Fahrzeuges „ausen“ (d.h. auf der Kurvenaussenseite) auftreten, die Unfalltypen beschränken sich aber auf 01 und 03.

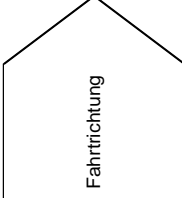
In der Rechtskurve (Abb. 5-32) treten bis zur Bogenmitte (BM) nur Unfälle „nach aussen ohne Schleudern“ auf, ebenso gibt es im Bereich nach dem Übergangsbogenende (ÜE) nur Unfälle „ohne Schleudern in Richtung Kurveninnen- und -aussenseite“. Zwischen Bogenende (BE) und Übergangsbogenende (ÜE) kann beim Unfall „nach aussen ohne Schleudern“ jeder Unfalltyp auftreten.

Abbildung 5-31: Spurtyp und Unfalltyp je Unfallort in Linkskurven

Linkskurve	Kurvenort					Endlage Unfallfahrzeug	Bewegungsart
	ÜA-BA	BA-BM	BM-BE	BE-ÜE	ÜE-G		
 <p>Fahrtrichtung</p>		Schneiden 1,3,5,6	Korrigieren 1,3,5,6 Schneiden 1,3,5,6 Hinaustragen 1,3,5,6	Korrigieren 1,3,5,6,10,60,61 Schneiden 1,3,5,6,10,60,61 Hinaustragen 1,3,5,6,10,60,61		innen	Schleudern
		Schneiden 1,3,5,6,10,60,61	Schneiden 1,3,5,6,10,60,61	Korrigieren 1,3,5,6,10,60,61 Schneiden 1,3,5,6,10,60,61 Ausholen 1,3,5,6,10,60,61 Hinaustragen 1,3,5,6,10,60,61			linear
		Ausholen 1,3,5,6 Hinaustragen 1,3,5,6	Ideal 1,3 Normal 1,3 Korrigieren 1,3 Schneiden 1,3 Ausholen 1,3 Hinaustragen 1,3	Korrigieren 1,3,5,6 Ausholen 1,3,5,6 Hinaustragen 1,3,5,6		ausser	Schleudern
		Korrigieren 1,3,5,6 Ausholen 1,3,5,6 Hinaustragen 1,3,5,6	Ideal 1,3 Normal 1,3 Korrigieren 1,3 Schneiden 1,3 Ausholen 1,3 Hinaustragen 1,3	Korrigieren 1,3,5,6 Schneiden 1,3,5,6 Ausholen 1,3,5,6 Hinaustragen 1,3,5,6			linear

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 5-32: Spurtyp und Unfalltyp je Unfallort in Rechtskurven

Rechtskurve	Kurvenort						Endlage Unfallfahrzeug	Bewegungsart
	ÜA-BA	BA-BM	BM-BE	BE-ÜE	ÜE-G			
			Ideal 1,3,5,6 Normal 1,3,5,6 Korrigieren 1,3,5,6 Ausholen 1,3,5,6	Korrigieren 1,3,5,6 Schneiden 1,3,5,6 Hinaustragen 1,3,5,6			Schleudern	
	Ausholen 10,60,61	Korrigieren 5,6,10,60,61 Ausholen 5,6,10,60,61	Ideal 1,3,5,6 Normal 1,3,5,6 Korrigieren 1,3,5,6 Ausholen 1,3,5,6	Korrigieren 1,3,5,6,10,60,61 Schneiden 1,3,5,6,10,60,61 Hinaustragen 1,3,5,6,10,60,61	Schneiden 5,6,10,60,61		ausser	linear
			Korrigieren 1,3,5,6 Schneiden 1,3,5,6 Ausholen 1,3,5,6	Korrigieren 1,3,5,6 Hinaustragen 1,3,5,6				Schleudern
			Korrigieren 1,3,5,6 Schneiden 1,3,5,6	Korrigieren 1,3,5,6 Ausholen 1,3,5,6 Hinaustragen 1,3,5,6	Hinaustragen 1,3			innen	linear

Quelle: eigene Darstellung

5.10.5. Gefährdungsmatrix

Ausgehend von den beiden Darstellungen in Kapitel 5.10.4 soll im folgenden Kapitel eine vertiefte Betrachtung zur möglichen Gefährdung in einer Kurve angestellt werden. Bei den vorangehenden Überlegungen wurden alle Spurtypen miteinbezogen. Für die weiteren Betrachtungen werden nur noch die vier unerwünschten Typen „Ausholen“, „Schneiden“, „Hinaustragen“ und „Korrigieren“ weiter verfolgt. Es wird angenommen, dass ein „idealer“ oder „normaler“ Spurverlauf nicht wesentlich resp. praktisch nicht zum Unfallgeschehen beiträgt.

In der Fehlerbaumanalyse wurden bisher keine Häufigkeiten für Ausfälle angegeben. Für eine theoretische Gefährdungsmatrix werden nun Überlegungen zu möglichen Häufigkeiten angestellt. Im folgenden Schritt werden deshalb neben den Häufigkeiten der Spurtypen und der Unfalltypen weiter die Häufigkeit der Versagensarten „Schleudern“ oder „lineares Gleiten“ sowie die Endlage des Fahrzeuges (Kurveninnen- oder -aussenseite) als Parameter für die Bewegungsart des Unfallfahrzeuges eingeführt. Als dritter Parameter wird die Auftretenshäufigkeit von Unfällen in einem bestimmten Kurvenbereich definiert. Mit diesen Angaben kann eine theoretische Gefährdungsmatrix erstellt werden. Die einzelnen Berechnungsschritte sind im nächsten Abschnitt dargestellt.

Für jede Kombination von Unfall- und Spurtypenhäufigkeiten, Endlage und Bewegungsart des Unfallfahrzeuges sowie Gewichtung des Kurvenortes kann für eine Kurve ein Index I gemäss untenstehender Formel bestimmt werden.

$$I = \sum (K_n \cdot (\sum S_i) \cdot (\sum U_j) \cdot B_m)$$

- I = Index für die Gefährlichkeit einer Kurve
 K_n = Faktor für die Gewichtung des Kurvenortes n , $n = [1, 5]$
 B_m = Faktor für die Endlage und Bewegungsart des Unfallfahrzeuges, $m = [1, 4]$
 S_i = Faktor für Spurtyp i , $i = [1, 6]$
 U_j = Faktor für Unfalltyp j , $j = [1, 7]$

In der Tabelle 5-9 ist ein Beispiel für die Gewichtung des Kurvenortes dargestellt. Es wird hier angenommen, dass sich 40% der Unfälle in einer bestimmten Rechtskurve im Bereich zwischen Bogenmitte (BM) und Bogenende (BE) ereignen.

Tabelle 5-9: Beispiel Gewichtung Kurvenort

Gewichtung Kurvenort Rechtskurve					Gewichtung Endlage Unfallfahrzeug und Bewegungsart		
ÜA-BA	BA-BM	BM-BE	BE-ÜE	ÜE-G	Endlage Unfallfahrzeug	Bewegungsart	Bj
K1	K2	K3	K4	K5			
5%	15%	40%	30%	10%	Kurveninnenseite	Schleudern	B1
						linear	B2
					Kurvenaussenseite	Schleudern	B3
						linear	B4

Quelle: eigene Darstellung

Die Tabelle 5-10 zeigt ein Beispiel für eine Gewichtung der Endlage des Unfallfahrzeuges und der Bewegungsart. Das Beispiel besagt, dass in der dargestellten Kurve 85% der Unfälle durch schleudernde Fahrzeuge verursacht wurden, zudem kommen über die Hälfte der Fahrzeuge auf der Kurvenaussenseite zu stehen.

Tabelle 5-10: Beispiel Gewichtung Endlage Unfallfahrzeug und Bewegungsart

Gewichtung Kurvenort Rechtskurve					Gewichtung Endlage Unfallfahrzeug und Bewegungsart			
ÜA- BA	BA- BM	BM- BE	BE- ÜE	ÜE-G	Endlage Unfallfahrzeug	Bewegungsart	B _j	
K1	K2	K3	K4	K5	Kurveninnenseite	Schleudern	B1	40%
						linear	B2	5%
					Kurvenaussenseite	Schleudern	B3	45%
						linear	B4	10%

Quelle: eigene Darstellung

Die Tabellen 5-11 und 5-12 zeigen die beiden Matrizen für Rechts- und Linkskurven, welche aus den vorangehenden Überlegungen (Abbildungen 5-31 und 5-32) entstanden sind. Für jeden Kurvenort werden in Abhängigkeit der Endlage des Unfallfahrzeuges und der Bewegungsart die Faktoren der Spuren (S_i) und der Unfalltypen (U_j) aufsummiert und mit den Faktoren für den Kurvenort (K_n) und Endlage und Bewegungsart (B_m) multipliziert. Die Summe aller Einzelfelder ergibt den Gefährdungsindex I der Kurve.

Tabelle 5-11: Matrize mit Gewichtung Rechtskurve

Gewichtung Kurvenort Rechtskurve					Gewichtung Endlage		
ÜA-BA	BA-BM	BM-BE	BE-ÜE	ÜE-G	Unfallfahrzeug und Bewegungsart		
K1	K2	K3	K4	K5	Endlage Unfallfahrzeug	Bewegungsart	Bj
		$K3 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B1$	$K4 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B1$		Kurveninnenseite	Schleudern	B1
		$K3 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B2$	$K4 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B2$	$K5 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B2$		linear	B2
		$K3 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B3$	$K4 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B3$		Kurvenaussenseite	Schleudern	B3
$K1 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B4$	$K2 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B4$	$K3 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B4$	$K4 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B4$	$K5 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B4$		linear	B4

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 5-12: Matrize mit Gewichtung Linkskurve

Gewichtung Kurvenort Linkskurve					Gewichtung Endlage		
ÜA-BA	BA-BM	BM-BE	BE-ÜE	ÜE-G	Unfallfahrzeug und Bewegungsart		
K1	K2	K3	K4	K5	Endlage Unfallfahrzeug	Bewegungsart	Bj
	$K2 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B1$	$K3 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B1$	$K4 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B1$		Kurveninnenseite	Schleudern	B1
	$K2 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B2$	$K3 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B2$	$K4 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B2$			linear	B2
	$K2 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B3$	$K3 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B3$	$K4 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B3$		Kurvenaussenseite	Schleudern	B3
	$K2 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B4$	$K3 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B4$	$K4 * (\sum(S_i) * \sum(U_i)) * B4$			linear	B4

Quelle: eigene Darstellung

In der untenstehenden Tabelle (Tab. 5-13) ist ein Beispiel für Häufigkeiten von Unfall- und Spurtypenverteilungen aufgezeigt. Die Beispielkurve hat einen Index von 14%.

Tabelle 5-13: Beispiel Gefährdungsindex I

Endlage Unfallfahrzeug	Bewegungsart B_m		Gewichtung Kurvenort K_n		Spurtypen S_i	
	Kurveninnenseite	Schleudern	40%	ÜA-BA	5%	(Ideal)	(20%)
linear		5%	BA-BM	15%	(Normal)	(35%)
Kurvenaussenseite	Schleudern	45%	BM-BE	40%	Ausholen	8%
	linear	10%	BE-ÜE	30%	Schneiden	18%
			ÜE-G	10%	Hinaustragen	10%
					Korrigieren	9%
Unfalltyp U_j						
1	3	5	6	10	60	61
19%	42%	2%	0%	14%	17%	6%
						I=14%

Quelle: eigene Darstellung

Um die Sensitivität der Matrix zu testen, wurden verschiedene Szenarien berechnet. Es wurden Szenarien gewählt, bei denen ein Spur- und ein Unfalltyp oder zwei Spur- und Unfalltypen erhöhte Häufigkeitswerte aufweisen. Die Werte der Parameter „Endlage Unfallfahrzeug und Bewegungsart“ und „Gewichtung Kurvenort“ wurden für alle Szenarien gleich gewählt (Tab. 5-14 und 5-15). Die Zahlen für Rechts- und Linkskurve sind in den beiden untenstehenden Tabellen aufgeführt.

In den grau schattierten Feldern sind die erhöhten Werte je Szenario markiert.

Die Sensitivitätsanalyse des Gefährdungsindex in der Linkskurve (Tab. 5-14) ergibt Werte zwischen 0.18 („Ausholen“ und Unfalltypen 60 und 61) und 0.49 („Korrigieren“ und Unfalltypen 1 oder 3). Generell weisen die Szenarien der Spurtypen „Schneiden“, „Hinaustragen“ und „Korrigieren“ leicht höhere Indexwerte auf als die Szenarien mit Kombinationen von Spurtypen.

Tabelle 5-14: Sensitivität Gefährdungsindex I Linkskurve

		Spurtypen							Index I						
		gleich	Ausholen	Schneiden	Hinaustragen	Korrigieren	Ausholen und Schneiden	Schneiden und Hinaustragen							
<i>(Ideal)</i>		25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
<i>(Normal)</i>		25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
Ausholen		10%	41%	3%	3%	3%	3%	21%	3%	21%	3%	21%	3%	21%	3%
Schneiden		10%	3%	41%	3%	3%	3%	21%	21%	3%	21%	21%	3%	21%	3%
Hinaustragen		10%	3%	3%	41%	3%	3%	3%	21%	21%	3%	21%	21%	3%	21%
Korrigieren		10%	3%	3%	3%	41%	3%	3%	3%	41%	3%	3%	3%	3%	3%
UT	1	3	5	6	10	60	61								
gleich	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	0.29	0.25	0.34	0.44	0.42	0.28	0.37	0.32
UT1	40%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	0.34	0.31	0.39	0.5	0.49	0.33	0.42	0.38
UT3	10%	40%	10%	10%	10%	10%	10%	0.34	0.31	0.39	0.5	0.49	0.33	0.42	0.38
UT5	10%	10%	40%	10%	10%	10%	10%	0.31	0.28	0.36	0.47	0.45	0.3	0.39	0.35
UT6	10%	10%	10%	40%	10%	10%	10%	0.31	0.28	0.36	0.47	0.45	0.3	0.39	0.35
UT10	10%	10%	10%	10%	40%	10%	10%	0.25	0.19	0.31	0.37	0.36	0.24	0.32	0.26
UT60	10%	10%	10%	10%	10%	40%	10%	0.25	0.19	0.31	0.37	0.36	0.24	0.32	0.26
UT61	10%	10%	10%	10%	10%	10%	40%	0.24	0.19	0.3	0.36	0.35	0.23	0.31	0.26
UT1/3	20%	20%	10%	10%	10%	10%	10%	0.29	0.26	0.34	0.44	0.42	0.29	0.37	0.33
UT60/ 61	10%	10%	10%	10%	10%	20%	20%	0.23	0.18	0.28	0.35	0.34	0.22	0.29	0.25

Quelle: eigene Darstellung

Die Sensitivitätsanalyse des Gefährdungsindex in der Rechtskurve (Tab. 5-15) ergibt Werte zwischen 0.09 („Schneiden“ oder „Schneiden“/ „Hinaustragen“ und Unfalltypen 10, 60 oder 61 sowie 60/61) und 0.27 („Korrigieren“ und Unfalltypen 01, 03, 05 oder 06). Generell weisen die Szenarien der Unfalltypen 10, 60 und 61 leicht tiefere Indexwerte auf als die Unfalltypen 01 bis 03. Die Werte der Szenarien mit kombinierten Spurtypen

sind praktisch gleich wie diejenigen mit einem einzelnen erhöhten Spurtypenanteil. Die Indexwerte sind in der Rechtskurve grundsätzlich tiefer als in der Linkskurve.

Tabelle 5-15: Sensitivität Gefährdungsindex I Rechtskurve

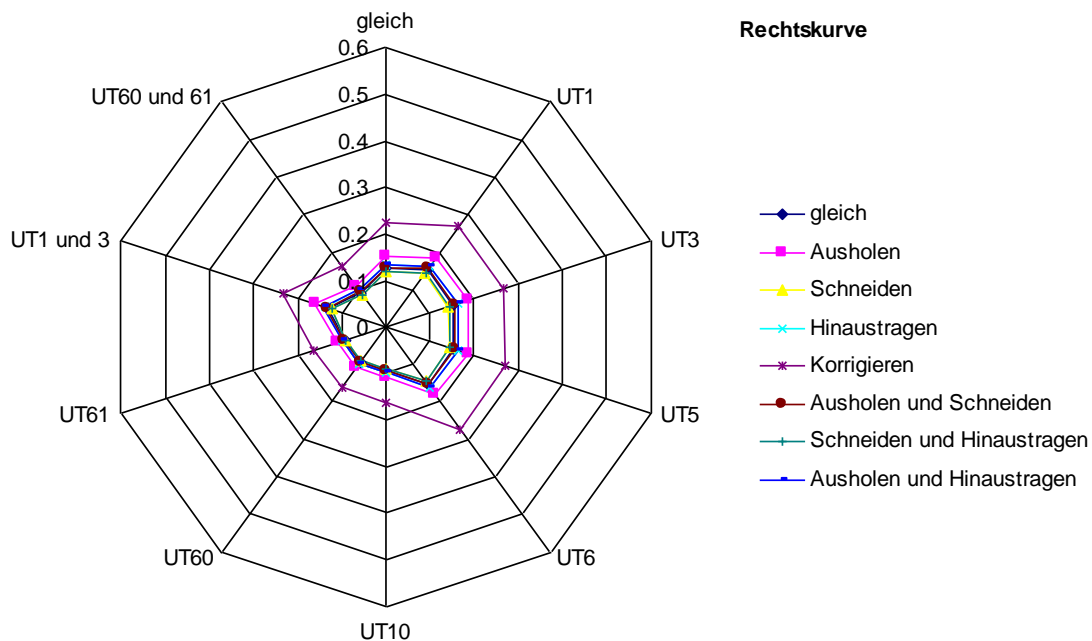
		Spurtypen								Index I							
		gleich	Ausholen	Schneiden	Hinaustragen	Korrigieren	Ausholen und Schneiden	Schneiden und Hinaustragen	Ausholen und Hinaustragen								
(Ideal)		25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%		
(Normal)		25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%		
Ausholen		10%	41%	3%	3%	3%	3%	21%	3%	21%	3%	21%	3%	21%			
Schneiden		10%	3%	41%	3%	3%	3%	21%	21%	3%	21%	21%	3%	3%			
Hinaustragen		10%	3%	3%	41%	3%	3%	3%	21%	21%	3%	21%	21%	3%			
Korrigieren		10%	3%	3%	3%	41%	3%	3%	3%	41%	3%	3%	3%	3%			
UT	1	3	5	6	10	60	61										
gleich	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	0.13	0.15	0.12	0.13	0.22	0.13	0.12	0.14		
UT1	40%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	0.15	0.18	0.14	0.16	0.27	0.15	0.14	0.17		
UT3	10%	40%	10%	10%	10%	10%	10%	0.15	0.18	0.14	0.16	0.27	0.15	0.14	0.17		
UT5	10%	10%	40%	10%	10%	10%	10%	0.15	0.19	0.14	0.16	0.27	0.16	0.14	0.17		
UT6	10%	10%	10%	40%	10%	10%	10%	0.15	0.18	0.14	0.16	0.27	0.15	0.14	0.16		
UT10	10%	10%	10%	10%	40%	10%	10%	0.09	0.11	0.09	0.1	0.16	0.09	0.09	0.1		
UT60	10%	10%	10%	10%	10%	40%	10%	0.09	0.11	0.09	0.1	0.16	0.09	0.09	0.1		
UT61	10%	10%	10%	10%	10%	10%	40%	0.09	0.11	0.09	0.1	0.16	0.09	0.09	0.1		
UT1/3	20%	20%	10%	10%	10%	10%	10%	0.13	0.16	0.12	0.14	0.23	0.13	0.12	0.14		
UT60/ 61	10%	10%	10%	10%	10%	20%	20%	0.09	0.11	0.09	0.1	0.16	0.09	0.09	0.1		

Quelle: eigene Darstellung

Der Vergleich der beiden Netzabbildungen (Abb. 5-33 und 5-34) zeigt, dass die Indices für Rechtskurven generell tiefer sind als für Linkskurven. Die Werte der Rechtskurve liegen für alle gewählten Szenarien ungefähr gleich, einzig das Szenario „Korrigieren“ weist leicht höhere Werte auf. Weiter

führen die Schleuder- und Selbstunfälle (Typen 01, 03, 05 und 06) zu höheren Indices als der Überholunfall (60) und die Frontalkollision (61). Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Unfalltypen 10, 60 und 61 jeweils Kollisionen mit dem Gegenverkehr sind und deshalb nur nach innen (Rechtskurve) oder nach aussen (Linkskurve) geschehen können, im Gegensatz zu einem Schleuderunfall der auf beide Kurvenseiten geschehen kann und dementsprechend häufiger in die Berechnung des Index einfließen kann.

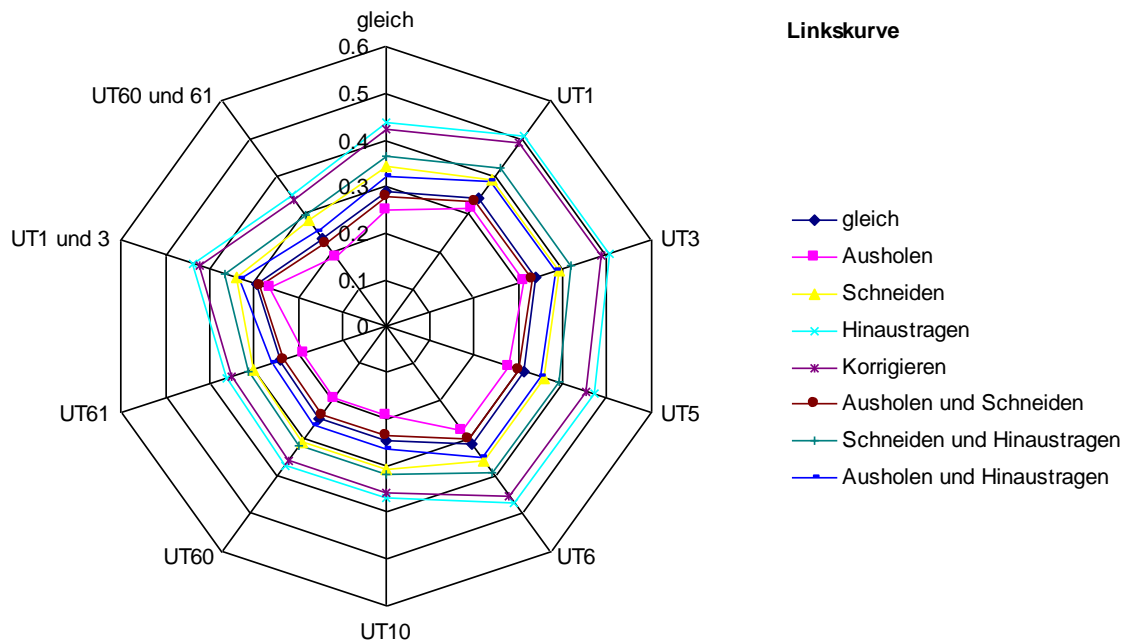
Abbildung 5-33: Spinne Gefährdungsindex I, Rechtskurve



Quelle: eigene Darstellung

In der Linkskurve sind die Werte für die einzelnen Spurtypen „Hinaustragen“ und „Korrigieren“ durchwegs am höchsten, gefolgt von „Schneiden“ (Abb. 5-34). Bei den kombinierten Typen ergeben „Schneiden und Hinaustragen“ sowie „Ausholen und Hinaustragen“ die höchsten Werte. Bei den Unfalltypen sind, gleich wie bei der Rechtskurve, die Schleuder- und Selbstunfälle diejenigen mit den höheren Indices.

Abbildung 5-34: Spinne Gefährdungsindex I, Linkskurve

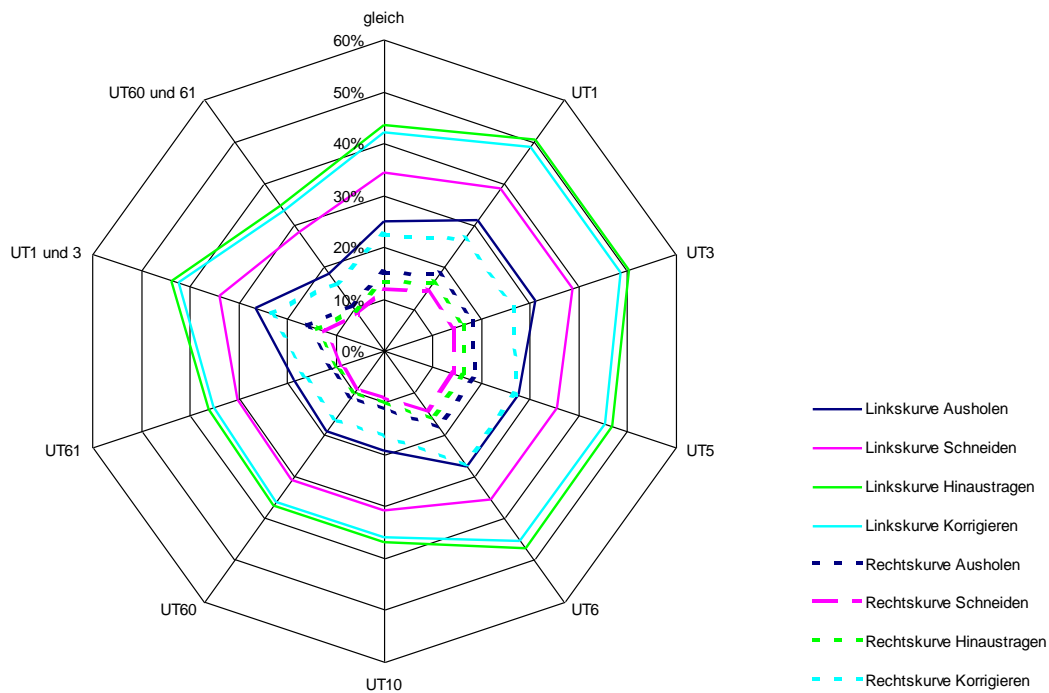


Quelle: eigene Darstellung

Vergleicht man die beiden Kurvenrichtungen miteinander (Abb. 5-35), so zeigt sich, dass die Gefährdung in Linkskurven unabhängig vom Spurtyp grösser ist als in Rechtskurven. In Linkskurven führen erhöhte Häufigkeiten der Spurtypen „Hinaustragen“ und „Korrigieren“ zu den höchsten Werten, in Rechtskurven sind es die Typen „Ausholen“ und „Korrigieren“.

Im Schnitt sind die Indexwerte für die Linkskurve rund 2.5 mal grösser als für die Rechtskurve.

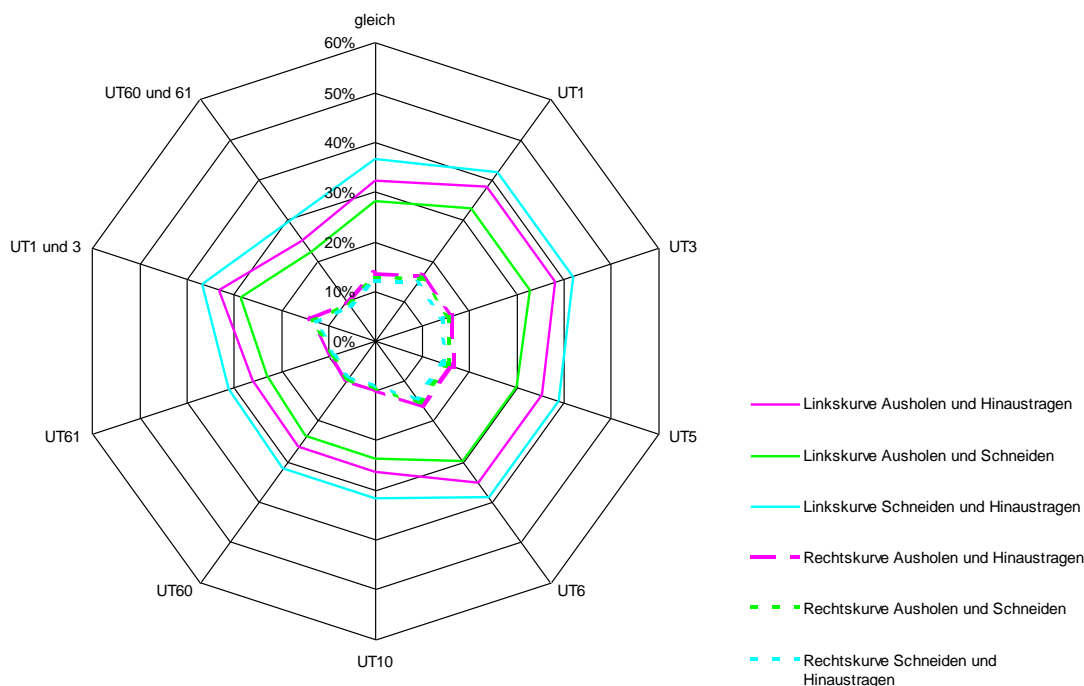
Abbildung 5-35: Spinne Gefährdungsindex I, einzelne Spurtypen mit erhöhter Häufigkeit



Quelle: eigene Darstellung

Bei den kombinierten Spurtypen sind die Indexwerte für die Linkskurve im Schnitt ca. 1.3 mal grösser als für die Rechtskurve (Abb. 5-36). In der Linkskurve sind die Werte für „Schneiden und Hinaustragen“ am höchsten, gefolgt von „Ausholen und Hinaustragen“. In der Rechtskurve liegen alle Werte dicht beieinander.

Abbildung 5-36: Spinne Gefährdungsindex I, zwei Spurtypen mit erhöhter Häufigkeit



Quelle: eigene Darstellung

Die oben dargestellten Netzdiagramme geben erste Hinweise auf das mögliche Gefährdungspotential einer Kurve und zeigen auf, dass theoretisch Unterschiede in der Gefährdung bestehen. Einzeln ist die Aussagekraft der Indexwerte zum jetzigen Zeitpunkt wegen mangelnder Vergleichbarkeit gering. Um die Matrix weiter zu verfeinern, bräuchte es noch Daten aus den Unfallaufnahmeprotokollen zur Endlage der Unfallfahrzeuge in Bezug auf die Kurvenhauptpunkte. Weiter müsste eine grosse Anzahl von Unfällen analysiert werden, um generellere Aussagen zu den Auftretenshäufigkeiten machen zu können, und letztendlich wäre es wichtig zu wissen, welche Versagensart zum Unfall geführt hat. Konkret heisst das, zu welchem Zeitpunkt hat der Unfallverursacher welche Lenkbewegungen gemacht. Offen ist auch, ob allenfalls noch weitere Einflussfaktoren aus der Fehlerbaumanalyse notwendig wären, um den Gefährdungsindex besser zu beschreiben. Es könnten z.B. Faktoren für verschiedene Elemente der Kurve, z.B. für vorhandene Mittellinien oder überbreite Fahrbahnen, in die Matrix einfließen oder

es könnte eine Gefährdungs-Gewichtung der Spurtypen im Sinne von „Schneiden ist schlimmer als Ausholen“ gemacht werden.

Wenn die oben erwähnten Punkte mit empirischen Daten geklärt werden könnten und die Anwendbarkeit dieses Gefährdungsindexes damit möglich wäre, so könnten mit allgemeinen Unfalldaten (Unfalltyp, Endlage Unfallfahrzeug etc.), z.B. einer Region oder einer Strecke, die Spurtypen einer Kurve erfasst und in einen Index umgewandelt werden. So könnte das Gefährdungspotential einer Kurve im Vergleich mit anderen Kurven beurteilt werden.

Mit dieser Methode könnten neben Unfall- und Spurtypen diejenigen Einflussfaktoren in die Betrachtung einer Kurve einfließen, die anhand der Fehlerbaumanalyse gefunden und in einem nächsten Schritt durch die Analyse von empirischen Daten als relevant befunden wurden.

5.11. Auswertung des Fehlerbaums und Ergebnisdiskussion

Die hier durchgeführte Fehlerbaumanalyse hat gezeigt, dass grundsätzlich bei allen betrachteten Unfalltypen sehr viele verschiedene Einflussfaktoren oder Kombinationen dieser Faktoren als Ursachen eines Unfalls in Frage kommen. Ein Einflussfaktor kann nicht eindeutig einem Unfalltypen zugeordnet werden. Weiter ist es mit der hier durchgeführten Fehlerbaumanalyse und den Kenntnissen aus der Literaturrecherche nicht möglich, messbare und direkte Abhängigkeiten der einzelnen Faktoren untereinander oder Gewichtungen und Häufigkeiten in allgemeiner Form darzustellen.

Obwohl es aus der Fehlerbaumanalyse heraus nicht möglich war, einzelnen Unfalltypen eindeutig definierbare Einflussfaktoren zuzuordnen, konnten unabhängige und abhängige Faktoren für die weitere Analyse gewonnen werden (Tab. 5-16).

Eine unabhängige Variable verändert sich während der gesamten Messdauer nicht und sie lässt sich während der Messdauer auch nicht durch eine andere Variable beeinflussen. Diese Variablen sind Inputgrößen im System und sind hier Variablen der Messkurven. Eine abhängige Variable ist von unabhängigen Variablen beeinflussbar und hat hier die Funktion einer

Output-Variable. Zu den unabhängigen Faktoren zählen alle Variablen der Kurve, wie z.B. Radius, Fahrbahnbreite, Quergefälle oder Streckentyp. Die abhängigen Variablen gliedern sich in die drei Bereiche „Kurve Spurtyp“, „Spurtyp“ und „Unfall“. Zur ersten Gruppe gehören Variablen, die während einer Messung gelten, z.B. die Witterung oder das Geschwindigkeitsniveau des gesamten Fahrzeugkollektivs. Die beiden Gruppen „Spurtyp“ und „Unfall“ definieren die Variablen, die einem einzelnen Fahrzeug oder Unfall zugeordnet werden können. Die Variablen in Tabelle 5-16 werden in Auswertung der empirischen Daten (vgl. Kapitel 7.) weiterverwendet.

Ungeachtet dessen, dass die Fehlerbaumanalyse alleine nicht die erwarteten Resultate geliefert hat, war sie dennoch eine notwendige Grundlage für die weiteren Überlegungen. Um trotz fehlender eindeutiger Aussagen im Fehlerbaum einen Zusammenhang zwischen dem Spurverhalten und den Unfallursachen zu finden, wurde aus den oben genannten Annahmen heraus im Kapitel 5.7 versucht, die physikalischen Mechanismen, die aufgrund von menschlichem Versagen bei einem Unfall zu tragen kommen, zu beschreiben. In einem nächsten Schritt wurden die beiden Versagensarten „Lenkfehler“ und „Haftreibungsverlust“ den Spurtypen und den einzelnen Kurvenorten zugeordnet. Zudem wurden die Unfalltypen ebenfalls möglichen Kurvenorten zugeteilt. Den Kurvenorten konnten so Spurtypen und Unfalltypen zugeordnet werden, und es konnten dennoch erste Trends erfasst werden. Aus diesen Überlegungen entstand dann eine Gefährdungsmatrix, mit der sich die möglichen Gefährdungspotentiale verschiedener Kurven abschätzen lassen.

5.12. Fazit aus Kapitel 5

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass jeweils nicht ein einziger Einflussfaktor oder ein einziger Spurtyp für einen Unfalltypen definiert werden kann. Dennoch konnten Unterschiede bezüglich der möglichen Kurvenorte eines Unfalltyps und den dazugehörigen Spurtypen gefunden werden.

Die Fehlerbaumanalyse lieferte in einem ersten Schritt viele verschiedene Einflussfaktoren, die als Grundlage für die weitere Analyse der empirischen

Daten in abhängige und unabhängige Variablen unterteilt wurden (Tab. 5-16).

Tabelle 5-16: unabhängige vs. abhängige Variablen

Unabhängige Variablen	Abhängige Variablen	
Kurve allgemein	Kurve Spurtyp	Spurtyp
<ul style="list-style-type: none"> • Radius [m] • Krümmungsrichtung [-] • Winkeländerung [°] • Übergangsbogen [-] • Summe Länge [m] • Länge der Zufahrtsgeraden [m] • Breite der Zufahrtsgeraden [m] • Breite in Bogenmitte [m] • p Bogenmitte [%] • i (ca. +/- %) bzgl. Hinverkehr • Sicht nach innen [-] • Sicherheitslinie durchgezogen [-] • Randmarkierung [-] • Mittellinie gestrichelt [-] • Streckencharakteristik [-] • Kurvenlage [-] • DTV [Fz] • Höchstgeschwindigkeit [km/h] • Geschwindigkeitssignal [-] • Strassenanlage [-] • Strassenbeleuchtung [-] • Streckentyp [-] 	<ul style="list-style-type: none"> • ΔV_m Zufahrt - Bogenanfang [km/h] • ΔV_m Bogenanfang - Bogenmitte [km/h] • ΔV_{85} Zufahrt - Bogenanfang [km/h] • ΔV_{85} Bogenanfang - Bogenmitte [km/h] • Temperatur [°C] • Strassenzustand [-] • Witterung [-] • Lichtverhältnisse [-] • V_m Zufahrt [km/h] • V_m Bogenanfang [km/h] • V_m Bogenmitte [km/h] • V_{85} Zufahrt [km/h] • V_{85} Bogenanfang [km/h] • V_{85} Bogenmitte [km/h] • Ideal [%] • Normal [%] • Korrigieren [%] • Schneiden [%] • Ausholen [%] • Hinaustragen [%] • Uebrige [%] 	<ul style="list-style-type: none"> • Spurtyp • V_{max} • R_{min} • Q_{max} • R_{max}/R_{kurve} • R_{min}/R_{kurve}
		<p>Unfall</p> <ul style="list-style-type: none"> • Unfallrichtung • Kurve (li/re) • Jahr • Monat • Uhrzeit • Wochentag • Anzahl beteiligte Personen • Anzahl verletzte Personen • Anzahl getötete Personen • Sachschaden • Unfalltyp • Strassenzustand • Witterung • Lichtverhältnisse • Alter • Geschlecht • Unfallfolge Lenker • Dauer Fahrberechtigung [Jahre] • Sicht

Quelle: eigene Darstellung

Dadurch, dass die Fehlerbaumanalyse nicht direkt einen Zusammenhang zwischen Unfall- und Spurtypen aufzeigte, musste in einem nächsten Schritt nach weiteren Möglichkeiten gesucht werden, um die beiden Grössen miteinander in Bezug zu bringen. Dafür wurden physikalische Versagensmechanismen, die am Ende zu einem Unfall führen, analysiert. Mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen gelang es, einerseits die Versagensarten den verschiedenen Spurtypen in unterschiedlichen Bereichen der Kurve zuzuordnen und andererseits Kurvenbereiche zu definieren, in denen die einzelnen Unfalltypen aufgrund dieser Versagensarten auftreten können. Die Kombination von Unfalltypen und Spurtypen je Kurvenbereich und Versagensart ergab bereits Hinweise auf Kurvenabschnitte mit vielen möglichen Spur- und Unfalltypen, also eher gefährdete Abschnitte und solche, in denen weder Versagen durch ungünstige Spurtypen noch Unfälle auftreten.

Anschliessend wurden die Häufigkeiten der Spurtypen und der Unfalltypen in einen Index I , der die mögliche Gefährdung in einer Kurve beschreibt, umgerechnet. Dazu waren noch ein Faktor für die Bewegungsart des Unfallfahrzeuges (Schleudern oder lineare Bewegung) im Zusammenhang mit der Endlage in Bezug zur Kurvenseite (innen oder aussen) sowie ein Faktor für die Gewichtung des Kurvenortes erforderlich.

$$I = \sum (K_n \cdot (\sum S_i) \cdot (\sum U_j) \cdot B_m)$$

- I = Index für die Gefährdung einer Kurve
 K_n = Faktor für die Gewichtung des Kurvenortes n , $n = [1, 5]$
 B_m = Faktor für die Endlage und Bewegungsart des Unfallfahrzeuges, $m = [1, 4]$
 S_i = Faktor für Spurtyp i , $i = [1, 6]$
 U_j = Faktor für Unfalltyp j , $j = [1, 7]$

Die Abbildung 5-37 zeigt beispielhaft verschiedene Werte für den Gefährdungsindex I für verschiedene Unfalltyp-Szenarien. Dem entsprechenden Unfalltypen wurde eine grosse Häufigkeit zugeordnet, ebenso den

verschiedenen Spurtypen. So erhielt z.B. der Schleuder- und Selbstunfall, ohne Kollision (Typ 01) eine 70%-Gewichtung, die übrigen Unfalltypen jeweils 5%.

Mit dem Wissen von Unfalltypenhäufigkeiten, Endlage des Unfallfahrzeuges und Bewegungsart kann das Erfassen von Spurtypen aufzeigen, ob eine Kurve im Vergleich mit anderen Kurven ein eher hohes oder eher tiefes Gefährdungsniveau aufweist.

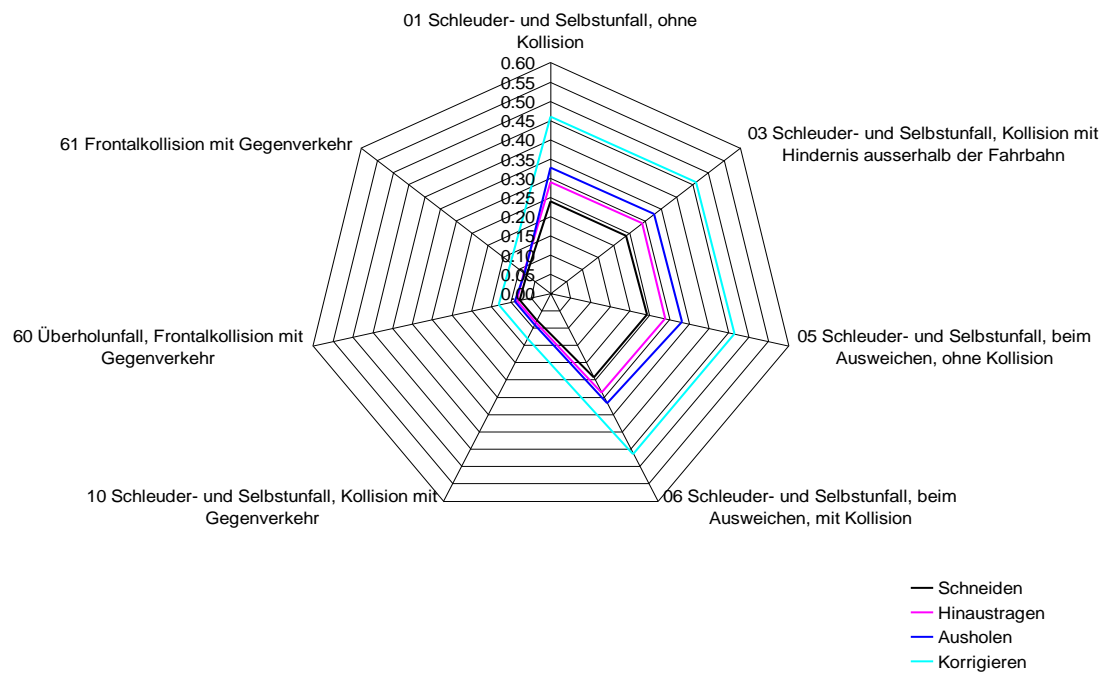
Mit empirischen Daten könnte die Berechnung verifiziert und allenfalls noch verfeinert werden. Beispielsweise könnte den Spurtypen ebenfalls eine Gewichtung zugeteilt werden. Die untenstehende Abbildung (Abb. 5-37) zeigt, dass „Korrigieren“ einen hohen Index verursacht, allerdings kann „Korrigieren“ in sehr vielen Kurvenbereichen auftreten und erhält deshalb einen eher hohen Stellenwert (s.a. Abb. 5-31 und 5-32). Eine Gewichtung der Spurtypen könnte dem entgegenwirken.

Aus den ersten Betrachtungen der Netzdiagramme können, obschon noch einige Punkte offen sind, erste Trends abgeleitet werden:

- Links- und Rechtskurven weisen mit den gleichen Eingangsparametern Unterschiede auf. Linkskurven scheinen gefährlicher zu sein als Rechtskurven.
- Die Schleuder- und Selbstunfälle 01 bis 06 ergeben höhere Indexwerte als die Unfalltypen 10, 60, 61.
- Es scheint Unterschiede zwischen den einzelnen Spurtypen zu geben. So klar wie hier die Differenzen der Werte auf den ersten Blick erscheinen, werden sie vermutlich mit einer Gewichtung der Spurtypen nicht mehr sein.

Die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls, deren Definition in der Fehlerbaumanalyse so nicht möglich war, könnte u. U. mit dem Index für die Gefährdung in einer Kurve näherungsweise abgeschätzt werden. Ebenfalls können die Spur- und Unfalltypen so in einen Zusammenhang gebracht werden.

Abbildung 5-37: Spinne Gefährdungsindex I, Beispiel Rechtskurve



Quelle: eigene Darstellung

6. Empirische Datenerhebungen

6.1. Einleitung

Die für diese Arbeit verwendeten empirischen Daten stammen aus zwei verschiedenen Quellen. Einerseits handelt es sich um Unfalldaten in verschiedenen Kurven, die Aussagen zu Unfallhäufigkeit, Typ der Unfälle und teilweise Ursachen ermöglichen. Andererseits sind es Daten zu Kurven wie Lage, Radius oder Fahrbahnbreite sowie Daten der gefahrenen Spurtypen in diesen Kurven. Sie geben Auskunft zum Fahrverhalten der einzelnen Lenker in einer Kurve.

6.2. Unfallgeschehen

6.2.1. Einleitung Unfallgeschehen

Zum Unfallgeschehen gehören die Zahl der Unfälle, aber auch die Häufigkeit der verschiedenen Unfalltypen oder die Merkmale der einzelnen Unfälle. In den folgenden Kapiteln wird auf die Auswahl und Herkunft der Unfalldaten eingegangen. Es wird zudem beschrieben, was eine verkehrstechnische Unfallauswertung ist und welche Unfalldaten in der vorliegenden Arbeit verwendet werden. Aus Datenschutzgründen werden die Daten hier anonym abgebildet.

6.2.2. Auswahl der Unfalldaten

Die Auswahl der Unfalldaten und damit auch der Messkurven erfolgte aufgrund des in Kapitel 4 angegebenen Vorgehens, einerseits durch Auswahl auf einer graphischen Oberfläche in der Unfalldatenbank des Kantons Aargau und andererseits durch die Übernahme von bereits früher gemessenen Kurven und den entsprechenden Unfalldaten im Kanton Zürich.

6.2.3. Unfalldaten aus Unfallaufnahmeprotokollen

Polizeilich erfasste Unfälle werden in der Schweiz mit einem einheitlichen Unfallaufnahmeprotokoll dokumentiert. In der SN 640 947 „Katalog für Strassendaten, Strassenverkehrsunfälle“³⁷, werden die Attribute zu den Kategorien Unfall, Verkehrsteilnehmer, Objekt und Mitfahrer beschrieben. Die untenstehende Abbildung zeigt ein Beispiel der zu erfassenden Daten eines Unfalles (Abb. 6-1 und 6-2).

Abbildung 6-1: Unfallaufnahmeprotokoll (Teil 1/2)

Strassenverkehrsunfall			
ANGABEN ZUM UNFALL			
Datenquelle	Unfall-Nr.	Anzahl Objekte	Unfalltyp
Unfalldatum	Unfallzeit	Hauptursache	Hauptverursacher (opt.)
Tag	Mon.	Jahr	Std. Min. unbekannt
Unfallort und -lokalisierung			
Kanton	pol. Gemeinde	BFS-Gemeindenr.	
<input type="checkbox"/> innerorts <input type="checkbox"/> ausserorts			
<input type="checkbox"/> National- <input type="checkbox"/> Kantonal- <input type="checkbox"/> Gemeinde-Privatstrasse		für Autobahn / Autostrasse: Bezeichnung Km Richtung	
Koordinaten			
VSS-Norm:	Eigentümer	Name	+□/□
Bezugspunkt	Distanz +□/□		m Abstand +□/□ m
Lokale Ortsbezeichnung			
Ortschaft			
Strasse / Haus-Nr.			
Strassenabschnitt			
Fahrbahn / Richtung ...			
Strassenart		Verkehrsbedingungen	Zonensignalisation
<input type="checkbox"/> Autobahn <input type="checkbox"/> Autostrasse <input type="checkbox"/> Hauptstrasse <input type="checkbox"/> Nebenstrasse <input type="checkbox"/> Nebenanlage <input type="checkbox"/> andere <input type="checkbox"/> unbekannt	<input type="checkbox"/> Einfahrt Autobahn/-strasse <input type="checkbox"/> Ausfahrt Autobahn/-strasse <input type="checkbox"/> Rampe in Verzweigung <input type="checkbox"/> Einbahnstrasse <input type="checkbox"/> andere	<input type="checkbox"/> schwach <input type="checkbox"/> rege <input type="checkbox"/> stark <input type="checkbox"/> stockende Kolonne <input type="checkbox"/> stehende Kolonne <input type="checkbox"/> andere	<input type="checkbox"/> keine <input type="checkbox"/> Tempo-30-Zone <input type="checkbox"/> Begegnungs-Zone <input type="checkbox"/> Fussgänger-Zone
		Höchstgeschwindigkeit	
		km/h	
		<input type="checkbox"/> temporär <input type="checkbox"/> Wechsellagerung <input type="checkbox"/> andere	

Quelle: ASTRA³⁸

³⁷ SN 640 947 Katalog für Strassendaten, Strassenverkehrsunfälle, VSS Zürich, 2004

³⁸ ASTRA>Dokumentation>Gesetzgebung

Abbildung 6-2: Unfallaufnahmeprotokoll (Teil 2/2)

Unfallstelle <input type="checkbox"/> gerade Strecke <input type="checkbox"/> Kreisell <input type="checkbox"/> Kurve <input type="checkbox"/> Einmündung Feldweg <input type="checkbox"/> Einmündung <input type="checkbox"/> Ein-/Ausfahrt Parkplatz <input type="checkbox"/> Kreuzung <input type="checkbox"/> Liegenschaft <input type="checkbox"/> Platz <input type="checkbox"/> Einmündung Fussweg <input type="checkbox"/> Parkplatz <input type="checkbox"/> Einmündung Radweg <input type="checkbox"/> Rasplatz <input type="checkbox"/> Radweg <input type="checkbox"/> andere <input type="checkbox"/> Radstreifen <input type="checkbox"/> Verkehrsbenützung		Strassenzustand <input type="checkbox"/> trocken <input type="checkbox"/> ölig <input type="checkbox"/> feucht <input type="checkbox"/> verschmutzt <input type="checkbox"/> nass <input type="checkbox"/> Schlagslöcher <input type="checkbox"/> verschneit <input type="checkbox"/> Spurrinnen <input type="checkbox"/> vereist <input type="checkbox"/> Frostspitzsand <input type="checkbox"/> pflichtschig <input type="checkbox"/> reduzierter Winterdienst <input type="checkbox"/> andere <input type="checkbox"/> andere	
Strassenanlage <input type="checkbox"/> eben <input type="checkbox"/> Brücke/Überführung <input type="checkbox"/> Gefälle <input type="checkbox"/> Tunnel <input type="checkbox"/> Steigung <input type="checkbox"/> Unterführung <input type="checkbox"/> Kuppe <input type="checkbox"/> Baustelle <input type="checkbox"/> andere <input type="checkbox"/> Umleitung <input type="checkbox"/> andere		Bahnübergang <input type="checkbox"/> mit Blinklicht <input type="checkbox"/> Schranken + Blinklicht <input type="checkbox"/> unbeleuchtet <input type="checkbox"/> andere	
Lichtverhältnis <input type="checkbox"/> Tag <input type="checkbox"/> Dämmerung <input type="checkbox"/> Nacht <input type="checkbox"/> unbekannt		Witterung <input type="checkbox"/> schön <input type="checkbox"/> starker Wind <input type="checkbox"/> bedeckt <input type="checkbox"/> Nebel <input type="checkbox"/> Regen <input type="checkbox"/> andere <input type="checkbox"/> Hagel <input type="checkbox"/> vereisender Regen <input type="checkbox"/> Schneefall	
Sicht <input type="checkbox"/> keine Beeinträchtigung <input type="checkbox"/> Sonnenblendung <input type="checkbox"/> Sichtbehinderung		Verkehrsregelung <input type="checkbox"/> keine <input type="checkbox"/> LSA in Betrieb <input type="checkbox"/> LSA Gelbblinkend <input type="checkbox"/> LSA nicht in Betrieb <input type="checkbox"/> LSA in Betrieb <input type="checkbox"/> LSA nicht in Betrieb <input type="checkbox"/> Blinklicht in Betrieb <input type="checkbox"/> Blinklicht nicht in Betrieb <input type="checkbox"/> Handzeichengabe <input type="checkbox"/> andere <input type="checkbox"/> LSA auf Anmeldeung	
Strassenbeleuchtung <input type="checkbox"/> keine <input type="checkbox"/> ausser Betrieb (inkl. Tag) <input type="checkbox"/> durchgehend <input type="checkbox"/> punktuell		Unfall <input type="checkbox"/> mit / <input type="checkbox"/> ohne Rapport	

14.05.2004 / Version 0.5 Formular_4_Beilage1

Strassenverkehrsunfall

SKIZZENBLATT Datenquelle: Unfall-Nr.:			
Objekt * Endlage verändert <input type="checkbox"/>			
Nr. 1	<input type="checkbox"/> Spurenlänge in Metern	Nr. 2	<input type="checkbox"/> Spurenlänge (m)
Nr. 3	<input type="checkbox"/> Spurenlänge (m)	Nr. 4	<input type="checkbox"/> Spurenlänge (m)
Nr. 5	<input type="checkbox"/> Spurenlänge (m)	Nr. 6	<input type="checkbox"/> Spurenlänge (m)
Nr. 7	<input type="checkbox"/> Spurenlänge (m)	Nr. 8	<input type="checkbox"/> Spurenlänge (m)
Unfallhergang auch beabsichtigte Fahrt-/Gehrichtung, Zeichengabe, Einspuren, Halt, gefahrene Geschwindigkeit etc. angeben			
Unfallskizze Fahrstreifenbreite in der Anfahrtsrichtung, Signalisation, Markierung (Richtungspfeile etc.) angeben			
Legende: <ul style="list-style-type: none"> ← beabsicht. Bewegungsrichtung vorwärts → beabsicht. Bewegungsrichtung rückwärts ←- - - unvorsichtiges Wegfahren ⊥ stehend ⚡ rutschend ⚡ schleudernd ⚡ in direkt beteiligtes Objekt ● Standort (Zeuge etc.) ⊗ FussgängerIn X Kollisionsstelle ↑ Nordpfeil 			
Messpunkte			
1. Messfeld	AB = cm	2. Messfeld	= cm
	BC = cm		= cm
	CD = cm		= cm
	DA = cm		= cm
	AC = cm		= cm
	BD = cm		= cm
Nicht möglich; Grund:			

14.05.2004 / Version 0.5 Folgeblatt mit gleicher Objekt-Nr. vorhanden

Quelle: ASTRA³⁹

³⁹ ASTRA>Dokumentation>Gesetzgebung

Obwohl in den Polizeirapporten immer auch eine Beschreibung des Unfallherganges zu finden ist, ist deren Aussagekraft z.T. beschränkt. Manche dieser Unfallhergangsbeschreibungen sind sehr kurz gehalten, in anderen wiederum ist die subjektive Meinung des Verfassers klar ersichtlich. Allen gemeinsam ist die Tatsache, dass die detaillierte Unfallursache für polizeiinternen Gebrauch nicht wirklich relevant ist und deshalb nur grob angegeben wird.

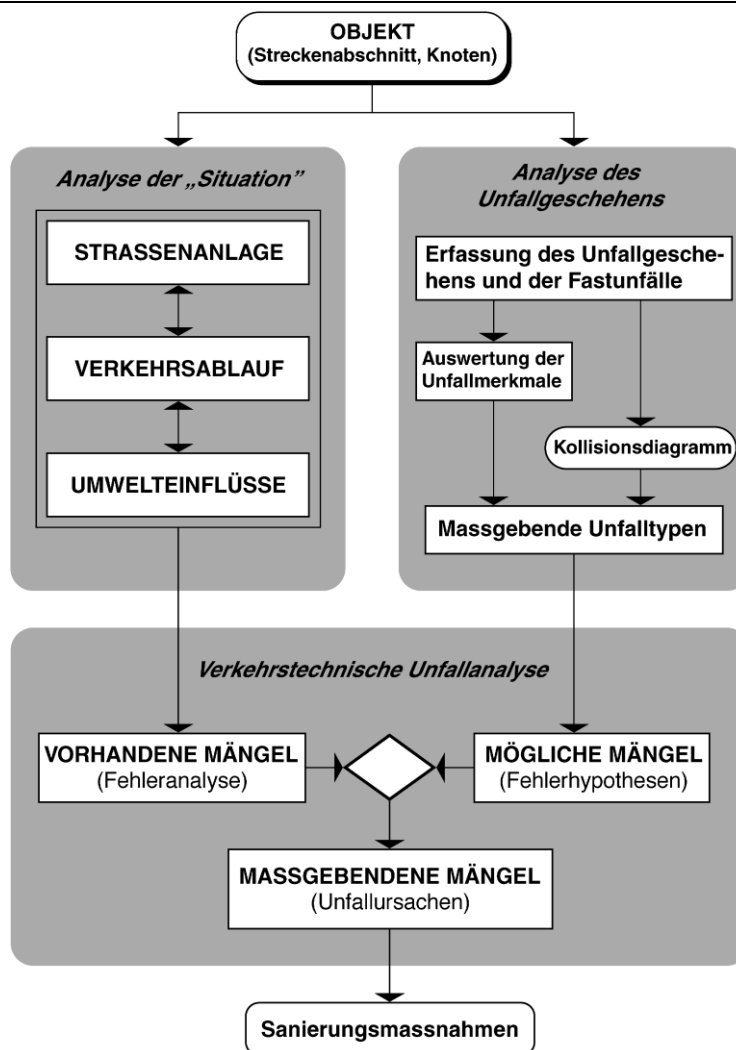
6.2.4. Vorgehen VUA

Bei einer Verkehrstechnischen-Unfall-Analyse⁴⁰ (Abb. 6-3) werden die Situation und das Unfallgeschehen getrennt analysiert. Um in diesem Stadium der Analyse keine voreiligen Schlüsse bezüglich der massgebenden Mängel der untersuchten Anlage zu ziehen, werden die beiden Analysen in einem ersten Schritt idealerweise von verschiedenen Personen durchgeführt. In einem zweiten Schritt werden die Resultate der Analyse der Situation und des Unfallgeschehens, d.h. die vorhandenen und die möglichen Mängel, zu den massgebenden Mängeln zusammengeführt.

In dieser Arbeit wird auf eine vertiefte Analyse der Situation verzichtet (vgl. 4.4.1), da nur Unfälle in Kurven ohne offensichtliche Mängel betrachtet wurden. Zudem sollen in der vorliegenden Arbeit andere oder ergänzende methodische Ansätze als die bereits bestehenden zur Unfallanalyse gesucht werden.

⁴⁰ SN 640 010, Strassenverkehrsunfälle; Unfallanalysen sowie Kurz-, Gefahren- und Risikoanalysen, VSS Zürich, 2001

Abbildung 6-3: Vorgehen verkehrstechnische Unfall-Analyse



Quelle: (Leemann, Lindenmann, Spacek 2010)

6.2.5. Unfalltypen

Das Bundesamt für Strassen ASTRA hat in den Dokumenten zur MISTRA Fachapplikation Verkehrsunfälle⁴¹ die möglichen Unfalltypen aufgelistet. Die folgenden Unfalltypen (Tab. 6-1) stehen in einem direkten Zusammenhang mit dem Fahrverhalten in Kurven und werden in dieser Arbeit ausgewertet (zum besseren Verständnis ist die folgende Tabelle aus Kapitel 5.3 nochmals aufgeführt):

⁴¹ MISTRA - Managementinformationssystem Strasse und Strassenverkehr Fachapplikation Verkehrsunfälle (VU) Instruktionen zum Unfallaufnahmeprotokoll (UAP), Anhang 1: Unfalltypen, Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern

Tabelle 6-1: Unfalltypen

Kategorie	Unfalltyp	Konfliktsituation
Schleuder- oder Selbstunfall	01	Ohne Kollision
	03	Kollision mit Hindernis ausserhalb der Fahrbahn
	04	Kollision mit anderem Verkehrsteilnehmer
	05	Beim Ausweichen, ohne Kollision
	06	Beim Ausweichen, mit Kollision
	10	Kollision mit Gegenverkehr
Überholunfall	60	Frontalkollision mit Gegenverkehr (ohne Überholen)
Frontalkollision	61	Streifen mit Gegenverkehr (ohne Überholen)

Quelle: ASTRA⁴²

Jede Kategorie hat jeweils noch einen Unfalltypen „anderer Unfall“. Diese werden hier nicht betrachtet, da die Angaben dazu in der Regel für eine vertiefte Analyse nicht ausreichend sind.

6.2.6. Unfalldaten

Die Unfalldaten, die in der vorliegenden Arbeit verwendet werden, stammen aus polizeilichen Unfallaufnahmeprotokollen und sind nicht anonymisiert. Aus Datenschutzgründen werden sie in der folgenden Tabelle (Tab. 6-2) in allgemeiner Form dargestellt. Neben den hier aufgeführten Angaben enthält ein Unfallaufnahmeprotokoll immer auch einen Beschrieb des Unfallhergangs und der beteiligten Personen.

⁴² MISTRA - Managementinformationssystem Strasse und Strassenverkehr Fachapplikation Verkehrsunfälle (VU) Instruktionen zum Unfallaufnahmeprotokoll (UAP), Anhang 1: Unfalltypen, Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern

Tabelle 6-2: Beispiel Unfalldaten

Kurve	Ort B	Ort B	Ort B	Ort B
Richtung	Hin	Hin	Hin	Hin
DTV	8200	8200	8200	8200
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	80	80	80	80
Geschwindigkeit-Signal	keines	keines	keines	keines
Strassenanlage	eben	eben	eben	eben
Strassenbeleuchtung	keine	keine	keine	keine
Kurve (links/rechts)	re	li	re	re
Jahr	2001	2003	2005	2008
Monat	4	9	6	8
Uhrzeit	20	19	16	15
Wochentag	Dienstag	Samstag	Freitag	Freitag
# beteiligte Personen	4	1	2	2
# verletzte Personen	2	0	1	2
# getötete Personen	0	0	0	0
Sachschaden [CHF]	15'000	28'000	23'000	17'000
Unfalltyp	4	3	4	4
Strassenzustand	trocken	trocken	trocken	nass
Witterung	schön	schön	schön	schön
Lichtverhältnisse	Tag	Tag	Tag	Tag
Alter	18	23	35	21
Geschlecht	männlich	männlich	weiblich	männlich
Unfallfolge Lenker	nicht verletzt	nicht verletzt	leicht verletzt	schwer verletzt
Fahrberechtigung [Jahre]	0.3	3.75	16	1.5

Quelle: Daten Kanton Aargau, eigene Darstellung

6.3. Messkurven

Wie in Kapitel 4 beschrieben, wurden die Messkurven einerseits aus einem früheren Forschungsauftrag (Belopitov, Spacek 1999) übernommen und andererseits aufgrund von Unfallhäufigkeiten neu ausgewählt. Vier der alten Kurven wurden zwecks Überprüfung der Homogenität des Fahrverhaltens der letzten Jahre erneut gemessen.

Als Vorgaben zur Auswahl der neuen Messkurven galten:

- die Kurve liegt ausserorts
- die Kurve liegt möglichst nicht im Einflussbereich eines Knotens
- das Längsgefälle sollte möglichst klein sein (<4%)
- es müssen sich Unfälle ereignet haben

Die untenstehende Tabelle (Tab. 6-3) gibt einen Überblick über die Messkurven und in Tabelle 6-4 sind Beispiele von Kurvenparametern dargestellt. Insgesamt wurden 23 Kurven aus dem Forschungsauftrag FA 01/96 (Belopitov, Spacek 1999) übernommen, davon wurden fünf Kurven erneut und neun Kurven 2011 erstmalig gemessen.

Tabelle 6-3: Messkurven

Ort	Kt.	Radius [m]	Krümmungsrichtung *	Winkeländerung [°]	Datenherkunft **
Grünigen	ZH	18	Linkskurve	101	FA01/96
Zürich - Wittikon	ZH	28	Rechtskurve	45.5	FA01/96
Oetwil a. S. - Binzikon	ZH	30	Linkskurve	99	FA01/96
Zürich - Gockhausen	ZH	31	Rechtskurve	135	FA01/96 / 2011
Zürich - Geeren/Witikon	ZH	48.5	Rechtskurve	67.8	FA01/96 / 2011
Hittnau - Pfäffikon	ZH	65	Linkskurve	132	FA01/96
Boppelsen - Buchs	ZH	65	Rechtskurve	57.2	FA01/96 / 2011
Affoltern a. A. - Aeugstertal	ZH	70	Linkskurve	62.5	FA01/96
Reppischtal, Stallikon - Aumüli	ZH	79	Linkskurve	72.5	FA01/96 / 2011

Nürensdorf - Breite/Winterthur	ZH	100	Linkskurve	32.7	FA01/96
Affoltern a. A. - Aeugstertal	ZH	115	Rechtskurve	43.6	FA01/96
Aeugstertal - Türlen	ZH	143	Linkskurve	46	FA01/96
Rümlang - Watt (Regensdorf)	ZH	150	Linkskurve	23.3	FA01/96
Effigen - Neu Stadel/Brugg	AG	150	Linkskurve	33.1	FA01/96
Sihltalstrasse	ZH	195	Linkskurve	59.4	FA01/96
Sihltalstrasse	ZH	200	Rechtskurve	69.6	FA01/96
Pfäffikon (ZH) - Hittnau	ZH	220	Rechtskurve	44.3	FA01/96
Birmenstorf - Gebenstorf	AG	233	Rechtskurve	43.6	FA01/96 / 2011
Rikon - Turbenthal	ZH	259	Rechtskurve	71.6	FA01/96
Sihltalstrasse,	ZH	290	Linkskurve	30.2	FA01/96
Birmenstorf - Gebenstorf	AG	315	Rechtskurve	33.2	FA01/96
Mettmenstetten - Knonau	ZH	385	Rechtskurve	47.7	FA01/96
Glatfelden - Neerach	ZH	700	Rechtskurve	44.8	FA01/96
Aarau	AG	118	Rechtskurve	76.4	2011
Bremgarten	AG	99.5	Linkskurve	77.1	2011
Egliswil	AG	86.9	Linkskurve	54.4	2011
Frick	AG	65	Linkskurve	55	2011
Koblenz	AG	150	Rechtskurve	113	2011
Mülligen	AG	70	Rechtskurve	81.9	2011
Seon	AG	213.6	Linkskurve	26.1	2011
Windisch	AG	51	Rechtskurve	139.4	2011
Wohlen	AG	160	Linkskurve	24.5	2011

* bezüglich Hinverkehr

** FA01/96 sind bereits früher gemessene Daten, 2011 sind neu gemessene Daten

Quelle: (Belopitov, Spacek 1999), eigene Darstellung

Die Tabelle 6-4 zeigt die Parameter jeder Messkurve in beiden Fahrtrichtungen am Beispiel von Aarau und Bremgarten. Die gesamten Kurvendaten sind im Anhang B zu finden.

Tabelle 6-4: Kurvendaten (Beispiele)

	Aarau	Aarau	Brem1	Brem1
Richtung Messpfosten	Hin	Gegen	Hin	Gegen
Radius [m]	118.3	118.3	99.5	99.5
Krümmungsrichtung	Rechtskurve	Linkskurve	Linkskurve	Rechtskurve
Winkeländerung [°]	76.4	76.4	77.1	77.19
Übergangsbogen	ja	ja	ja	ja
Summe Länge [m]	157.8	157.8	133.88	133.88
Länge Zufahrtsgerade [m]	40	20	29.72	80
Breite Zufahrtsgerade [m]	3.35	3.4	3.75	3.70
Breite in Bogenmitte [m]	3.3	3.45	4.2	4.05
p Bogenmitte [%]	7	7	6.7	8
i bzgl. Hinverkehr [%]	0	0	1.5	-1.5
Sicht nach innen	2	3	2	2
Sicherheitslinie durchgezogen	ja	ja	ja	ja
Randmarkierung	ja	ja	ja	ja
Mittellinie gestrichelt	nein	ja	nein	nein
Streckencharakteristik	gestreckt	gestreckt	gestreckt	gestreckt
Kurvenlage	freies Feld	freies Feld	Wald	Wald
Höchstgeschwindigkeit	80	80	60	60
Randmarkierungen	ja	ja	ja	ja
DTV	8200	8200	12'000	12'000

Quelle: eigene Darstellung

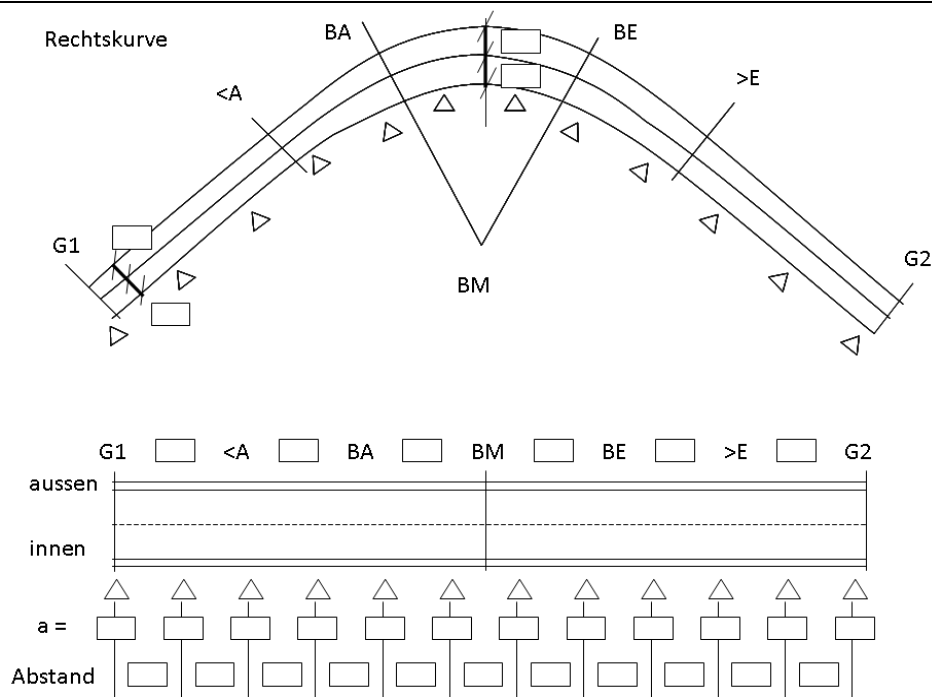
6.4. Spurdaten

6.4.1. Messung

Die Messung in einer Kurve fand wegen der begrenzten Akkulaufzeit der Messpfosten jeweils an einem Tag statt, die Dauer der Messung, i.d.R. zwei bis vier Stunden, ergab sich aus der Anzahl der aufgezeichneten Fahrzeuge.

Maximal konnten 12 Messpfosten aufgestellt werden. Mit diesen Pfosten konnten die Spurtypen im Bereich der fünf Kurvenhauptpunkte – Übergangsbogenanfang (ÜA), Bogenanfang (BA), Bogenmitte (BM), Bogenende (BE) und Übergangsbogenende (ÜE) - und im Annäherungsbereich der Kurve (G1, G2) erfasst werden. Wenn möglich wurden die Pfosten mit gleichem Abstand vor und nach einem Kurvenhauptpunkt aufgestellt. Die Abbildung 6-4 zeigt eine Messanordnung in einer Rechtskurve. In den rechteckigen Kästchen wurde (von unten nach oben) der Abstand zwischen den einzelnen Pfosten, der Abstand der Pfosten zum Fahrbahnrand (a), die Distanzen zwischen den Kurvenhauptpunkten sowie die Fahrbahnbreiten an den entsprechenden Stellen angegeben.

Abbildung 6-4: Beispiel einer Messanordnung Rechtskurve, Messrichtung Hinverkehr



Quelle: eigene Darstellung, >A = ÜA, >E = ÜE

Da Fahrzeuge in Gegenrichtung durch den pfostennäheren Verkehr (Hinverkehr) verdeckt sein konnten, wurden nicht in beiden Richtungen die gleichen Verkehrsmengen gemessen. Je nachdem, ob die Messpfosten am inneren oder äusseren Fahrbahnrand aufgestellt wurden, wurde eine Kurve als Rechts- oder Linkskurve bezeichnet.

6.4.2. Auswertung der Messdaten

Die Speicherkarten der Messpfosten wurden mit einem Lesegerät ausgelesen und mit dem Programm „IVT-Spur“ ausgewertet. Jeder einzelne Messpfosten erfasste für jedes Fahrzeug die folgenden Grössen:

1. Fahrzeug ID als fortlaufende Nummerierung
2. Durchfahrtszeit [ms]
3. Fahrzeuglänge [m]
4. Seitlicher Abstand Fahrzeug – Pfosten [cm]
5. Fahrtrichtung [Hin- / Gegenrichtung]

Ausgehend von diesen Daten verfolgte das Spurprogramm mit Hilfe einer kubischen Splinefunktion die erfassten Fahrzeuge von Pfosten zu Pfosten und ordnete die Spuren im Anschluss einem Spurtypen zu. Die folgenden Abbildungen zeigen die Daten, die das Programm ausgibt.

Die Abbildung 6-5 zeigt die Tabelle der verfolgten Fahrzeuge in einer Fahrtrichtung. Für jeden Pfosten werden der seitliche Abstand von Fahrzeugflanke zum Strassenrand und die gemessene Geschwindigkeit sowie die Fahrzeuglänge angegeben.

In der ersten Spalte (Nr[9]) ist die Fahrzeugnummer ersichtlich. In den weiteren Spalten steht unter den einzelnen Pfostennummern (9, 7, 1, 2, 11, 12 und 3) der seitliche Abstand der Fahrzeugflanke zum Pfosten in Zentimetern und unter „km/h“ die mittlere Geschwindigkeit zwischen zwei Pfosten. In der letzten Spalte gibt das Programm die Fahrzeuglänge an. Ein „X“ bedeutet, dass das Programm ein Fahrzeug an den weiteren Pfosten nicht mehr zuordnen konnte. Fahrzeug Nummer 3 fuhr mit seitlichen

Abständen zwischen 54 und 134cm und zwischen 38.4 und 52.2 km/h an den Messpfosten vorbei.

Abbildung 6-5: Beispiel Spurverläufe aus Fahrzeugverfolgung

***** Verfolgung durch Pfosten DOL2-H, 1.Messung *****

* Messbeginn: 16.05.97 ; 10:42:52
 * Messende: 16.05.97 ; 14:02:02
 - Minimale zeitlcke: 4.00 s

Hinverkehr:

Nr [9]	9	km/h: 7	km/h: 1	km/h: 2	km/h: 11	km/h: 12	km/h: 3	Länge [cm]					
3	98	52.2	134	42.5	98	38.0	54	38.4	66	261			
13	90	41.5	118	41.9	98	38.7	54	40.4	98	240			
17	66	52.4	54	X	X	47.4	54	46.6	106	281			
67	66	58.4	154	58.6	150	54.4	62	55.2	58	328			
91	62	46.9	102	47.7	82	45.3	54	46.7	86	288			
156	70	49.4	90	50.1	70	47.1	62	46.5	98	220			
168	106	51.6	134	52.1	94	49.2	54	46.7	70	314			
190	54	59.4	98	59.4	82	57.3	54	57.2	82	254			
219	82	58.4	94	X	X	53.2	90	46.2	122	133			
231	426	50.8	186	50.9	150	48.3	54	X	X	323			
233	70	50.1	122	50.6	110	47.4	74	45.1	78	303			
237	78	61.1	174	57.6	174	50.6	122	X	X	270			
250	58	49.8	78	50.8	86	47.3	54			345			
254	62	46.1	82	40.4	66	25.8	70			378			
259	62	52.0	74	X	X	38.7	58			273			
264	86	56.8	126	58.3	130	51.8	86			257			
267	54	59.2	78	58.0	62	52.6	62	X	X	281			
270	94	60.9	126	61.0	102	57.3	82	X	X	318			
278	70	53.7	98	54.2	86	51.0	78			342			
298	146	60.9	158	57.6	166	52.0	134	X	X	151			
305	74	54.8	114	55.8	114	47.6	82			342			
327	78	40.1	94	39.3	94	36.0	78	X	X	225			
328	70	56.0	86	55.6	70	49.6	54	X	X	324			
344	94	34.5	110	34.1	86	30.6	82	X	X	169			
350	70	41.4	118	42.1	102	40.2	62	X	X	187			
384	54	51.6	106	49.6	102	45.5	62	47.7	62	239			
394	58	52.3	94	52.6	90	49.2	70	X	X	264			
401	102	46.8	114	46.3	86	44.0	54	X	X	272			
413	90	52.9	126	53.9	110	50.6	70	50.1	66	261			
420	74	44.9	86	44.8	70	43.0	58	X	X	251			
463	66	43.4	90	42.9	90	37.8	98	X	X	222			
475	70	48.9	110	48.0	154	42.0	74	X	X	105			
550	54	53.4	70	55.8	66	55.4	338			350			
575	54	49.0	98	52.3	98	48.1	90			306			
34:	86	51.2	109	50.5	101	46.3	79	47.2	83	47.7	73	48.2	103

Quelle: Programm IVT-Spur

Abbildung 6-6 zeigt im oberen Teil den Spurtyp, den minimal gefahrenen Radius, die maximale Geschwindigkeit, die maximale Querbeschleunigung der einzelnen Fahrzeuge sowie den jeweiligen Kurvenort an.

Die Abbildung 6-6 unten (Statistik) gibt an, wie viele Fahrzeuge von welchem Spurtyp gemessen wurden.

Z.B. wurde dem Fahrzeug Nummer 219 der Spurtyp „3“ zugeordnet. Es fuhr einen minimalen Radius von 27.3m bei 53m nach dem Messstartpunkt und hatte eine maximale Geschwindigkeit V_{max} von 60 km/h beim Messstartpunkt, d.h. in der Gerade vor der Kurve. Die maximale Querbeschleunigung wurde 54m nach dem Messstartpunkt erreicht und

betrug 5.6m/s^2 . Die Fahrzeugnummern ab 3000 sind eine Zusammenfassung aller Fahrzeuge und der einzelnen Spurtypen. Insgesamt wurden 34 Fahrzeuge verfolgt.

Abbildung 6-6: Beispiel der einzelnen Fahrzeuge und Werte je Fahrzeug

DOL2-HRP1 - Editor

Datei Bearbeiten Format Ansicht ?

G2: -99. < FZA < -99.

```

;
UAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA;
Nr: Typ: Rmin [m]: bei: vmax [km/h]: bei: qmax[m/s2] bei:
AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA'
 3 8 26.1 53 59.5 0 3.7 54
 13 7 25.4 53 46.5 109 4.4 61
 17 7 28.1 53 54.8 0 5.5 61
 67 8 24.6 53 59.6 20 9.1 61
 91 7 26.1 53 48.3 21 5.9 55
 156 7 26.2 53 50.3 21 5.8 54
 168 7 26.3 53 52.5 19 6.0 54
 190 7 25.8 53 63.4 109 9.3 61
 219 3 27.3 53 60.0 0 5.6 54
 231 8 24.4 53 56.8 109 7.0 54
 233 7 25.7 53 51.4 21 5.7 61
 237 8 25.4 53 61.6 0 6.8 61
 250 8 72.7 43 51.3 21 2.1 44
 254 8 71.4 43 47.9 0 -1.0 44
 259 8 70.6 43 57.9 0 -1.0 44
 264 8 72.6 43 58.5 20 2.7 31
 267 8 26.6 53 59.2 16 6.7 54
 270 8 25.8 53 61.6 19 8.8 54
 278 7 71.6 43 54.4 19 2.4 44
 298 8 25.6 53 61.8 0 9.2 61
 305 8 72.3 43 56.8 20 2.2 44
 327 7 26.0 53 41.1 109 3.2 61
 328 8 26.1 53 61.3 109 7.1 61
 344 7 26.3 53 36.8 109 2.2 61
 350 7 25.6 53 52.0 109 5.0 61
 384 7 25.6 53 57.2 109 6.8 61
 394 8 26.0 53 62.1 109 7.2 61
 401 7 25.8 53 53.6 109 5.8 61
 413 7 25.5 53 54.2 21 7.3 61
 420 7 26.2 53 45.3 19 4.9 54
 463 8 26.8 53 43.7 19 2.8 54
 475 8 24.2 53 61.1 109 5.8 61
 550 8 60.9 30 56.8 44 3.6 31
 575 8 72.2 43 52.1 23 2.3 44
 30000 7 25.9 53 51.1 15 6.1 61
 30000 8 28.0 56 0.0 0 -1.0 13004
 30003 3 27.3 53 63.0 0 6.5 54
 30007 7 26.2 53 51.7 109 6.1 54
 30008 8 26.6 53 53.9 20 5.8 54
AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA'
 39: 32.4 45 48.8 40 4.5
AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAU

```

Statistik:

```

AAAAAAAAAA
Spurtyp: Anzahl: QMax: Nr: QMin: Nr: RMin: Nr: RMax: Nr:
AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA
Alle (0): 34 9.3 190 2.2 344 25.4 13 71.6 278
Ideal (1): 0
Normal (2): 0
Korrigieren (3): 1 5.6 219 5.6 219 27.3 219 27.3 219
Schneiden (4): 0
Ausholen (5): 0
Hinaustr. (6): 0
Uebrige (7): 15 9.3 190 2.2 344 25.4 13 71.6 278
Crash (8): 18

```

Quelle: Programm IVT-Spur

Die Abbildung 6-7 zeigt, welchem Fahrzeug welcher Spurtyp zugeordnet wurde, es zeigt aber auch die seitlichen Abstände vom Fahrbahnrand an den jeweiligen Kurvenhauptpunkten.

Das unten dargestellte Beispiel stammt aus den Messungen, die für die vorliegende Arbeit durchgeführt wurden und zeigt exemplarisch die Probleme mit dem Messsystem. Entweder wurden die Fahrzeuge unter „crash“ aufgeführt, d.h. ein gemessener Wert überstieg die definierten Randbedingungen oder es konnten nur ganz wenige Spuren einem andern Typen als „Übrige“ zugeordnet werden.

Abbildung 6-7: Beispiel Kontrolltabelle zur Spurtypenunterscheidung

```

DOL2-H.ST1 - Editor
Datei Bearbeiten Format Ansicht ?
Kontrolltabelle zur Spurtypenunterscheidung in MESSUNG\FA01\12DOLD2\DOL2-H
AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA
Crash-Abweichung Hinverkehr: 0.10 m/m
Gegenverkehr: 0.10 m/m
Nr:   G1   UA   BA   BM   BE   UE   G2   Typ:
3     Crash
13    0.65  0.52  0.50  0.55  0.58  0.59  0.78  Uebrige
17    0.56  0.34  0.59  0.64  0.66  0.52  0.57  Uebrige
67    Crash
91    0.55  0.49  0.51  0.55  0.57  -0.42 -1.45  Uebrige
156   0.58  0.48  0.54  0.57  0.59  0.59  0.66  Uebrige
168   0.71  0.50  0.50  0.53  0.55  0.42  0.75  Uebrige
190   0.52  0.49  0.49  0.52  0.54  0.55  0.66  Uebrige
219   0.62  0.49  0.65  0.68  0.69  0.65  0.91  Korrigiere
231   ÄÄ> schleudern ab 2.00 m      Crash
233   0.58  0.58  0.53  0.55  0.55  0.52  0.65  Uebrige
237   Crash
250   Crash
254   Crash
259   Crash
264   Crash
267   Crash
270   Crash
278   0.58  0.56  0.69  0.66  0.60  0.08  -0.59  Uebrige
298   Crash
305   Crash
327   0.61  0.56  0.57  0.60  0.61  0.54  0.72  Uebrige
328   Crash
344   0.66  0.54  0.61  0.65  0.67  0.64  0.71  Uebrige
350   0.58  0.54  0.52  0.55  0.57  0.53  0.63  Uebrige
384   0.52  0.55  0.48  0.49  0.49  0.50  0.71  Uebrige
394   Crash
401   0.69  0.49  0.51  0.55  0.58  0.57  0.57  Uebrige
413   0.65  0.58  0.49  0.50  0.50  0.54  0.71  Uebrige
420   0.59  0.47  0.53  0.58  0.60  0.57  0.68  Uebrige
463   ÄÄ> schleudern ab 106.00 m    Crash
475   Crash
550   ÄÄ> schleudern ab 33.00 m      Crash
575   Crash
30000 0.64  0.57  0.55  0.57  0.57  0.54  0.73  Uebrige

```

Quelle: Programm IVT-Spur

Neben den Angaben zu den einzelnen Fahrzeugen ermöglicht das Programm auch Angaben zu den Quantilen des Geschwindigkeitsniveaus im Kurvenbereich in den einzelnen Kurven.

6.5. Auswertbare empirische Daten

6.5.1. Unfalldaten

Die verwendeten Unfalldaten sind aus den Jahren 2000 bis 2009 und stammen von zehn Kurven aus dem Kanton Aargau. Insgesamt konnten 148 Unfälle analysiert werden (Tab. 6-5). Die Zahl der Unfälle je Kurve beträgt zwischen zehn und 23.

Tabelle 6-5: Messkurven: empirische Unfalldaten für Auswertung

Ort	Anzahl Unfälle je Unfalltyp (01.01.2000 – 31.12.2009)							
	01	03	05	06	10	60	61	Total
Aarau	1	4			1		4	10
Birmenstorf - Gebenstorf	7	2				1	1	11
Bremgarten	3	12				1	1	17
Egliswil	3	6					2	11
Frick	7	7				1	3	18
Koblentz	6	9				5	3	23
Mülligen	4	10						14
Seon	5	1				1	3	10
Windisch	2	11				2	4	19
Wohlen	2	10	1				2	15
Total	40	72	1	0	1	11	23	148

Quelle: Unfalldatenbank des Kantons AG

6.5.2. Spurdaten

Anders als vorgesehen, lieferten nicht alle gemessenen Kurven am Ende verwendbare Spurdaten. Einerseits konnten nicht mehr allen Kurven die benötigten Attribute für die hier geplante Auswertung zugeordnet werden und andererseits wurde nach den neuen Messungen festgestellt, dass die Zuverlässigkeit der gemessenen Daten nicht genügend gross war. Als weitere Schwierigkeit erwies sich die Auswertesoftware, die mit den heutigen Computersystemen nicht mehr einwandfrei funktionierte.

Es wurden deshalb die folgenden zehn Kurven mit 1584 Einzelspuren ausgewählt und nur mit diesen Daten weiter gearbeitet (Tab. 6-6). Die Anzahl der Spurdaten je Kurve betrug zwischen 71 und 448.

Tabelle 6-6: Messkurven Übersicht

Ort	Kt.	Radius [m]	Krümmungsrichtung *	Anzahl Spuren
Hittnau - Pfäffikon	ZH	65	Linkskurve	183
Boppelsen - Buchs	ZH	65	Rechtskurve	101
Affoltern a. A. - Aeugstertal	ZH	70	Linkskurve	100
Reppischtal, Stallikon - Aumüli	ZH	79	Linkskurve	219
Affoltern a. A. - Aeugstertal	ZH	115	Rechtskurve	110
Aeugstertal - Türlen	ZH	143	Linkskurve	115
Effigen - Neu Stadel/Brugg	AG	150	Linkskurve	71
Sihltalstrasse	ZH	195	Linkskurve	429
Sihltalstrasse	ZH	200	Rechtskurve	147
Pfäffikon (ZH) - Hittnau	ZH	220	Rechtskurve	90
Total				1565

* bezüglich Hinverkehr

Quelle: (Spacek 1998)

Die folgende Tabelle (Tab. 6-7) zeigt die Anzahl der Spuren je Spurtyp und Kurve. Der grösste Teil der Spuren sind „Übrige“, gefolgt von „Schneiden“ und „Normal“.

Wie bereits in Kapitel 1.4 beschrieben, werden Spuren, die an einem oder mehreren Punkten der Kurve die Bedingungen eines Spurtyps („Ideal“ bis „Hinaustragen“ in Tab. 6-7) nicht erfüllen, den „übrigen“ Spuren zugeordnet. Auch fehlerhafte Messungen, die den Abstand des Fahrzeuges zum Messpfosten falsch erfassen, führen zu dieser grossen Anzahl „übrige“ Spurtypen.

Tabelle 6-7: Messkurven, Spurverteilung

Ort	R [m]	Ideal	Normal	Korrigieren	Schneiden	Ausholen	Hinaustragen	Übrige	crash	Anzahl Spuren
Hittnau - Pfäffikon	65	1	18	8	62	17	3	72	2	183
Boppelsen - Buchs	65		9	1	28	6	5	51	1	101
Affoltern a. A. - Aeugstertal	70	1	20		48		5	26		100
Reppischtal, Stallikon - Aumüli	79	1	38	1	46	8	1	122	2	219
Affoltern a. A. - Aeugstertal	115	1	53	3	9	7	3	34		110
Aeugstertal - Türlen	143		8	3	21	5	9	69		115
Effigen - Neu Stadel/Brugg	150		12		29	1	1	26	2	71
Sihltalstrasse	195		65	28	122		14	188	12	429
Sihltalstrasse	200	3	12	1		1		129	1	147
Pfäffikon (ZH) - Hittnau	220	1	30		11		3	45		90
Total		8	265	45	376	45	44	762	20	1565

R = Radius

Quelle: (Spacek 1998)

7. Auswertungen, Statistik

7.1. Grundlagen

Im folgenden Kapitel 7 werden die Daten gemäss den in Kapitel 4 vorgestellten Methoden ausgewertet. Kapitel 7.2 befasst sich mit der für die Rough Set Analyse notwendigen Bildung von Kategorien je Attribut. Es wird unterschieden zwischen allgemeinen Attributen der Kurven, wie z.B. Radius oder Krümmungsrichtung, den Attributen der Kurve während der Messung, z.B. Witterung, den Attributen der Fahrspuren sowie den Attributen der Unfalldaten. In Kapitel 7.3 werden die Resultate aus der Auswertung der Unfalldaten und in Kapitel 7.4 aus der Auswertung der Spurdaten behandelt. Kapitel 7.5 fasst am Ende die Resultate zusammen.

7.2. Gruppenbildung der Attribute

Für die Analyse der Daten mittels Rough-Set-Algorithmus mussten die einzelnen Attribute in Kategorien zusammengefasst werden. Diese Attribute wurden ebenfalls für die statistischen Analysen mit SPSS verwendet. Die Wahl der Attribute erfolgte aufgrund der Resultate der Fehlerbaumanalyse. Für die Bildung der einzelnen Kategorien wurde, wo möglich, auf bereits bekannte Einteilungen wie z.B. Mindestradien und zugehörige Projektierungsgeschwindigkeiten in den Projektierungsnormen zurückgegriffen. Eine andere Quelle waren die Unfallaufnahmeprotokolle der Polizei und die dort verwendeten Kategorien von Strassenzustand oder Angaben zur Strassenbeleuchtung. Wo nicht auf solche Grundlagen zurückgegriffen werden konnte, wurden möglichst plausible Kategorien gebildet. Dabei gibt es eine Gruppe von allgemeinen Attributen je Kurve, also Attribute die sowohl für Unfalldaten als auch für die Spurdaten gültig sind. Solche Attribute sind z.B. der Radius, die Fahrbahnbreite oder vorhandene Markierungen. Zu einer weiteren Gruppe gehören die Attribute einer Kurve, die nur während der „Pfostenmessung“ galten, d.h. für alle Fahrzeuge resp.

Spuren in dieser Kurve. Als Beispiel seien hier die mittlere Geschwindigkeit aller Fahrzeuge während der Messung oder die vor Ort gemessene Temperatur genannt. Bei der Gruppe der Attribute für die einzelnen Fahrspuren sind der Spurtyp oder der minimal gefahrene Radius als Beispiele zu erwähnen. Zur vierten Gruppe, den Unfallattributen, gehören alle Angaben, die direkt mit dem Unfall an sich sowie dem Unfallverursacher zu tun haben, wie z.B. der Unfalltyp oder die Tageszeit.

In den ersten drei Gruppen wurden maximal zwölf Kategorien bestimmt, bei den Unfallattributen wurden die Jahre von 1997 bis 2012 in 15 und die Uhrzeit in 24 Kategorien eingeteilt. In den nachfolgenden Kapiteln wird die Kategorienbildung näher beschrieben.

7.2.1. Gruppenbildung für die allgemeinen Attribute der Kurven

Zu den allgemeinen Attributen der Kurve gehören einerseits geometrische Kennwerte einer Kurve (Radius, Winkeländerung, Fahrbahnbreite, etc.) und andererseits Angaben zur Strecke oder zum unmittelbaren Umfeld der Kurve (Strassenart, Kurvenlage). In der untenstehenden Tabelle (Tab. 7-1) sind die Attribute, die dazugehörigen Werte und die entsprechenden Kategorien aufgeführt.

Tabelle 7-1: Attribute je Kurve (allgemein)

Parameter	Kategorie					
	1	2	3	4	5	6 (bis 8)
Radius [m]	≤ 45	45 - 75	75 - 120	120 - 175	175 - 240	> 240
Krümmungsrichtung [-]	Linkskurve	Rechtskurve				
Winkeländerung [°]	< 30	30 - 60	60 - 90	90 - 120	> 120	
Übergangsbogen [-]	ja	nein				
Summe Länge [m]	< 50	50 - 100	100 - 200	200 - 300	> 300	
Länge Zufahrtsgeraden [m]	< 50	50 - 150	150 - 300	> 300		
Breite Zufahrtsgeraden [m]	< 2.8	2.8 - 3.0	3.0 - 3.2	3.2 - 3.4	3.4 - 3.6	> 3.6
Breite in Bogenmitte [m]	< 3.0	3.0 - 3.2	3.2 - 3.4	3.4 - 3.6	...	> 4.2
p Bogenmitte [%]	< 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	> 7
i bzgl. Hinverkehr [%]	< -4%	< -2%	-2% bis 0%	< 2%	< 4%	> 4%
Sicht nach innen [-]	< UA-BA	< UA-BM	< UA-BE			
Sicherheitslinie durchgezogen [-]	ja	nein				
Randmarkierung [-]	ja	nein				
Mittellinie gestrichelt [-]	ja	nein				
Streckencharakteristik [-]	gestreckt	kurvig				
Kurvenlage [-]	freies Feld	Wald	einseitige Vegetation			
DTV [Fz]	< 1'000	1'000 - 3'000	3'000-10'000	> 10'000	> 15'000	
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	40	50	60	70	80	
Geschwindigkeits-Signal [-]	signalisiert	nicht signalisiert				
Strassenanlage [-]	eben	Gefälle	Steigung	andere		
Strassenbeleuchtung [-]	keine	punktuell	durchgehend	andere		
Streckentyp [-]	Verbin-dungs- strasse (Schleichweg)	Hauptverbin- dungsstrasse	andere			

Quelle: eigene Darstellung

Nachfolgend wird auf die einzelnen Parameter in Tabelle 7-1 eingegangen.

Radius

Die einzelnen Kategorien der Kurvenradien wurden entsprechend der Projektierungsgeschwindigkeiten V_p gewählt. Die Projektierungsgeschwindigkeit ist die höchste Geschwindigkeit, mit der ein idealisiertes Fahrzeug (Massenpunkt mit idealer Spur) eine Kurve noch sicher befahren kann. Die Sicherheit ist per Definition gewährleistet, wenn ein Fahrzeug auf Sichtweite noch anhalten kann. Dafür soll in einer Kurve der tangentielle Anteil f_L des Reibungskoeffizienten μ nicht mehr als 90% betragen. Als maximale Querneigung p_{max} wird in der Kurve mit 0.07 (7%) gerechnet. Die Projektierungsgeschwindigkeit wird mit der folgenden Formel bestimmt:

$$V_p = \sqrt{127 \cdot R \cdot (zul f_R + p_{max})}$$

V [km/h] = Geschwindigkeit

R [m] = Radius

$$zul f_R = 0.436 \mu$$

$p_{max} = 0.07$ = maximale Querneigung

Die Kurvenradien wurden analog des Forschungsauftrages zu den Geschwindigkeiten in Kurven (Belopitov, Spacek 1999) in sechs Kategorien eingeteilt (Tab. 7-2).

Tabelle 7-2: Radien und Projektierungsgeschwindigkeit

	1	2	3	4	5	6
Radius [m]	≤ 45	45 - 75	75 - 120	120 - 175	175 - 240	> 240
V_p [km/h]	< 40	40 - 50	> 50 - 60	> 60 - 70	> 70 - 80	> 80 *

* In Kurven mit Radien > 240 m gilt die signalisierte Höchstgeschwindigkeit

Quelle: SN 640 080⁴³

⁴³ SN 640 080, Projektierung; Geschwindigkeit als Projektierungselement, VSS Zürich, 1991

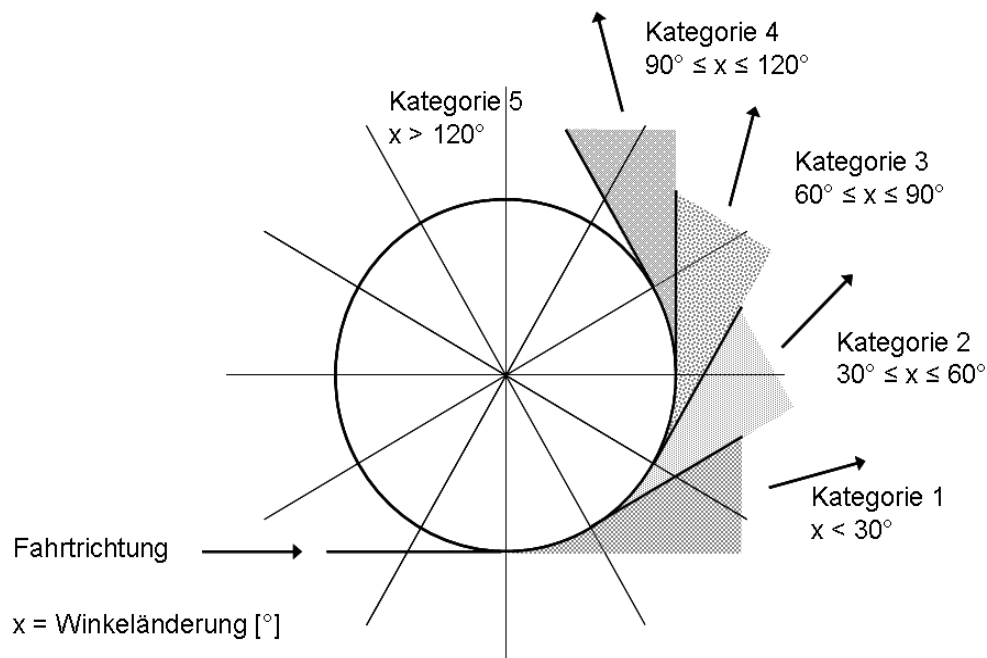
Krümmungsrichtung

Bei der Krümmungsrichtung wird unterschieden zwischen Links- und Rechtskurve. Während bei der Rechtskurve der rechte Rand als Führungselement bei der Kurvenfahrt dient, so folgt der Fahrzeuglenker in der Linkskurve der Mittellinie oder bei deren Fehlen dem linken Rand. In der Rechtskurve kann die Sicht durch angrenzende Bepflanzung oder Hang Einschnitte stark eingeschränkt sein, während in der Linkskurve, bedingt durch die Fahrstreifen der Gegenrichtung, die Sichtweite i.d.R. grösser ist.

Winkel der Richtungsänderung

Die Winkeländerung in Grad wird in fünf Kategorien mit Schritten von 30° unterteilt. In der untenstehenden Abbildung (Abb. 7-1) sind die verschiedenen Kategorien und die dazugehörigen Winkeländerungen einer Linkskurve dargestellt.

Abbildung 7-1: Kategorien der Winkeländerung einer Kurve



Quelle: eigene Darstellung

Übergangsbogen

In dieser Kategorie wird angegeben, ob eine Kurve in Fahrtrichtung aus Gerade-Übergangsbogen-Kreisbogen besteht oder ob bei der Trassierung auf einen Übergangsbogen verzichtet wurde.

Summe Länge

Die Summe der Längen setzt sich aus der Länge der Übergangsbogen sowie der Länge des Kreisbogens zusammen, sie entspricht der Kurvenlänge. Die Unterteilung der Kategorien erfolgte in Schritten von 50m oder 100m. Kategorie 1 und 2 haben Intervalle von 50m, die Kategorien 3 und 4 von 100m, in Kategorie 5 sind Kurven mit einer Länge von über 300m klassiert.

Länge Zufahrtsgeraden [m]

Die Länge der Zufahrtsgeraden entspricht der gemessenen Geradenlänge. Sie muss nicht gleich der gesamten Länge einer Geraden vor der Kurve sein, da der Einsatz der Messpfosten auf zwölf beschränkt war. Die Intervalle der einzelnen Kategorien betragen unter 50m, 50m bis 150m, 150m bis 300m und über 300m Länge.

Breite Zufahrtsgeraden [m]

Die Kategorien der Breiten der Zufahrtsgeraden haben jeweils ein Intervall von 0.2m, diese sind von unter 2.8m bis über 3.6m Breite gleichmässig verteilt.

Breite in Bogenmitte [m]

Die Kategorien der Breiten in Bogenmitte haben jeweils ein Intervall von 0.2m und erstrecken sich gleichmässig von unter 3.0m Breite bis über 4.2m Breite. Die Breite in Bogenmitte ist aufgrund der Kurvenverbreiterung im Allgemeinen grösser als die Breite der Zufahrtsgeraden.

Quergefälle p in Bogenmitte [%]

Um die Sicherheit durch genügende Entwässerung zu gewährleisten und um einen Teil der Fliehkräfte in der Kurve zu kompensieren, wird das Quergefälle in der Kurve im Vergleich zur Geraden erhöht. Gemäss Projektierungsnorm⁴⁴ werden 7% als ideales Gefälle im Kreisbogenbereich (Kurvenmitte) angegeben. Die Kategorien werden in 1-%-Schritte unterteilt, von kleiner als 3% bis grösser als 7%.

Längsgefälle i bzgl. Hinverkehr [%]

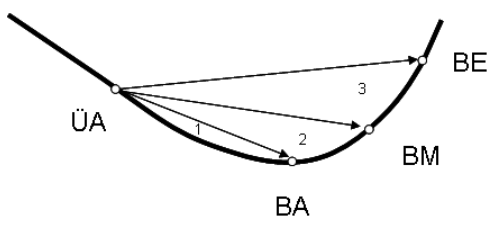
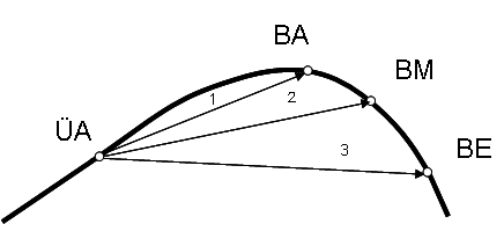
Es wurde versucht, Kurven in möglichst ebenem Gelände zu finden. Allerdings liegen Kurven oftmals in Abschnitten mit einer gewissen Längsneigung. Die Kategorien wurden in Intervallschritten von 2% unterteilt, von einem Gefälle von mehr als -4% bis zu einer Steigung von mehr als 4%.

Sicht nach innen [-]

Das Attribut „Sicht nach innen“ gibt darüber Auskunft, wie gut die gesamte Kurve vom Fahrzeuglenker überblickt werden kann. Die drei Kategorien sind in Tabelle 7-3 dargestellt.

⁴⁴ SN 640 120, Linienführung; Quergefälle in Geraden und Kurven, Quergefallsänderung, VSS Zürich, 1996

Tabelle 7-3: Sicht in Richtung Kurveninnenseite

	Kategorie		
	1	2	3
Sicht nach innen [-]	< UA-BA	< UA-BM	< UA-BE
	stark eingeschränkt	begrenzt	offen
Linkskurve			
Rechtskurve			

Quelle: (Belopitov, Spacek 1999)

Die Sicht nach innen ist stark eingeschränkt, wenn man vom Übergangsbogenanfang bis maximal zum Kreisbogenanfang sieht (Kat. 1, Abb. 7-2 links), begrenzt ist sie, wenn die Sicht bis zur Bogenmitte reicht und offen, wenn der gesamte Kreisbogen überblickt werden kann (Kat. 3, Abb. 7-2 rechts).

Abbildung 7-2: Sicht nach innen

Sicht stark eingeschränkt

Sicht offen

Quelle: eigene Abbildung

Sicherheitslinie durchgezogen [-]

Die in dieser Kategorie wird definiert, ob in der betreffenden Kurve eine durchgezogene Sicherheitslinie vorhanden ist oder nicht. Diese Linie kann einerseits als Führungshilfe bei der Spurhaltung in Linkskurven dienen, andererseits zeigt sie dem Fahrzeuglenker an, dass die Sichtweiten für einen Überholvorgang zu gering sind (Abb. 7-3, rechts).

Randmarkierung [-]

Das Attribut der Randmarkierung wird in die zwei Kategorien “ja” und “nein” unterteilt. Sie helfen dem Fahrzeuglenker bei der Erkennung der Kurve. Die Abbildung 7-3 zeigt links eine Kurve ohne jegliche Randmarkierung und rechts zeigt sie eine Strasse mit Sicherheitslinie und mit Randmarkierungen auf beiden Strassenseiten.

Abbildung 7-3: Randmarkierungen



Ohne Randmarkierung



mit Sicherheitslinie und Randmarkierungen

Quelle: eigene Abbildung

Mittellinie gestrichelt [-]

Wenn die Sichtweiten in einer Kurve so gross sind, dass ein gefahrloses Überholen möglich ist, kann eine Mittellinie gestrichelt ausgeführt werden (Abb. 7-4 links). Wenn die Sichtweite nur in eine Fahrtrichtung diesen Anforderungen entspricht, kann die durchgezogene Mittel- bzw. Sicherheitslinie auf einer Seite mit einer gestrichelten Linie ergänzt werden (Abb. 7-4 rechts)

Abbildung 7-4: Mittellinie



Gestrichelte Mittellinie



durchgezogene Sicherheitslinie

Quelle: eigene Abbildung

Streckencharakteristik [-]

Die Streckencharakteristik definiert die Art der gesamten Strecke, auf der sich die Kurve befindet, z.B. zwischen zwei Ortschaften. Sie wird unterteilt in gestreckt und kurvig. Eine gestreckte Strasse hat wenige Kurven, kleine Richtungsänderungen und ist bezüglich Radienfolgen homogen trassiert. Ein Fahrzeuglenker erwartet auf einer solchen Strecke keine Kurven mit starken Richtungsänderungen und kleinen Radien. Eine kurvige Strasse hat ständige Richtungswechsel, der Fahrzeuglenker wird von engeren Kurvenradien nicht überrascht.

Kurvenlage [-]

Eine Kurve kann einerseits in offenem Gelände (Abb. 7-5 links) oder andererseits im Wald liegen (Abb. 7-5 rechts), dazwischen gibt es einen Bereich mit einseitiger Vegetation (Abb. 7-5 Mitte). Die Kurvenlage kann einen Einfluss auf die Lichtverhältnisse oder die optische Führung im Strassenverlauf haben.

Abbildung 7-5: Kurvenlage

Offenes Gelände

einseitige Vegetation

beidseitige
Vegetation

Quelle: eigene Abbildung

DTV [Fz]

Der durchschnittliche tägliche Verkehr DTV gibt an, wie viele Fahrzeuge täglich einen Strassenquerschnitt (in beide Richtungen) passieren. Die Kategorien (Tab. 7-4) wurden unterteilt in weniger als 1000 Fahrzeuge pro Tag, bis zu mehr als 15'000 Fahrzeuge pro Tag, was einer stark belasteten

Strasse entspricht. Die maximale Leistungsfähigkeit einer zweistreifigen Strasse wird mit 2000 Fz/h (beide Richtungen) angenommen⁴⁵.

Tabelle 7-4: DTV

	% von DTV	Kategorie				
		1	2	3	4	5
DTV [Fz]	100	< 1'000	1'000 - 3'000	3'000 - 10'000	10'000 - 15'000	> 15'000
pro Std. * [Fz]	ca. 6	< 60	60 - 180	180 - 600	> 600	> 900

* Ca. Anzahl Fahrzeuge pro Stunde in beide Richtungen (im Querschnitt) während der Messung zwischen 9 Uhr und 14 Uhr.

Quelle: SN 640 948⁴⁶

Höchstgeschwindigkeit [km/h]

Die Höchstgeschwindigkeit bezeichnet die signalisierte Geschwindigkeit einer Strecke oder einer Kurve, sie wird unterteilt in fünf Kategorien von 40 km/h bis 80 km/h.

Geschwindigkeits-Signal [-]

Das Attribut "Geschwindigkeits-Signal" gibt an, ob in einer Kurve eine Geschwindigkeitsreduktion gegenüber der generellen Limite signalisiert ist oder nicht (Abb. 7-6). Wenn beispielsweise eine Strecke für eine Projektierungsgeschwindigkeit von 80 km/h signalisiert ist, darf der minimale Kurvenradius nicht kleiner als 240m sein. Hat eine Kurve einen

⁴⁵ SN 640 020a; Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit, zweistreifige Strassen ohne bauliche Richtungstrennung, VSS Zürich, 2010

⁴⁶ SN 640 948, Katalog für Verkehrsdaten; Grundlagen, VSS Zürich, 2001

Radius von 120m, muss die Geschwindigkeit u.U. auf 60 km/h reduziert werden^{47,48}, z.B. wenn der weitere Streckenverlauf nicht vorhersehbar ist.

Abbildung 7-6: Kurve mit Geschwindigkeitssignalisation



Quelle: eigene Abbildung

Strassenanlage [-]

Das Attribut der Strassenanlage bezeichnet die Lage der Kurve im Längenprofil einer Strecke. Die vier Kategorien sind „eben“, „Gefälle“, „Steigung“ oder „andere“, wenn keine näheren Angaben vorliegen.

Strassenbeleuchtung [-]

Strassen ausserorts sind in der Regel nicht beleuchtet. Eine Ausnahme können Gegebenheiten sein, die in der Nacht nicht intuitiv erfasst werden können und besondere Aufmerksamkeit von Seiten der Fahrzeuglenker verlangen. Eine punktuelle Beleuchtung kann an besonderen Stellen wie z.B. einem Fussgängerstreifen angeordnet werden (Abb. 7-7).

⁴⁷ SN 640 080b, Projektierung, Grundlagen; Geschwindigkeit als Projektierungselement, VSS Zürich, 1991

⁴⁸ SN 640 100a, Linienführung; Elemente der horizontalen Linienführung VSS Zürich, 1997

Abbildung 7-7: Strassenbeleuchtung in Kurven



Quelle: eigene Abbildung

Streckentyp [-]

Das Attribut „Streckentyp“ wird in „Verbindungsstrasse“ und „Hauptverkehrsstrasse“ sowie „andere“ unterschieden. Eine Verbindungsstrasse (Abb. 7-8 links) weist in der Regel eine geringere Verkehrsbelastung auf als eine Hauptverkehrsstrasse (Abb. 7-8 rechts), der Ausbaustandard ist geringer, d.h. die Strasse ist z.B. schmaler. Gemäss SN 640 040b⁴⁹ bezeichnet eine lokale Verbindungsstrasse eine „untergeordnete, regionale oder zwischenörtliche Verbindung“, während eine Hauptverkehrsstrasse eine „hohe Leistung bei mittleren Geschwindigkeiten“ gewährleistet und eine nationale bis zwischenörtliche Bedeutung im Strassennetz hat.

Abbildung 7-8: Streckentyp



Verbindungsstrasse

Hauptverkehrsstrasse

Quelle: eigene Abbildung

⁴⁹ SN 640 040b, Projektierung, Grundlagen; Strassentypen, VSS Zürich, 1992

7.2.2. Gruppenbildung der Attribute der Kurven während der Messung

Die Attribute der Kurven während der Messung (Tab. 7-5) bilden Eigenschaften des gesamten Fahrzeugkollektivs ab. Dazu gehören z.B. das Geschwindigkeitsniveau, die Witterung während der Messung oder der Anteil der verschiedenen Spurtypen.

Tabelle 7-5: Attribute je Kurven während der Messung

Parameter	Kategorie					
	1	2	3	4	5	6 (...11)
Vm Zufahrt [km/h]	< 50	50 - 55	55 - 60	60 - 65	...	> 80
Vm Bogenanfang [km/h]	< 40	40 - 45	45 - 50	50 - 55	...	> 80
Vm Bogenmitte [km/h]	< 40	40 - 45	45 - 50	50 - 55	...	> 80
V85 Zufahrt [km/h]	< 60	60 - 65	65 - 70	70 - 75	...	> 90
V85 Bogenanfang [km/h]	< 40	40 - 45	45 - 50	50 - 55	...	> 85
V85 Bogenmitte [km/h]	< 40	40 - 45	45 - 50	50 - 55	...	> 85
delta Vm Zufahrt - Bogenanfang [km/h]	< 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	> 20	
delta Vm Bogenanfang -Bogenmitte [km/h]	< 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	> 20	
delta V85 Zufahrt - Bogenanfang [km/h]	< 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	> 20	
delta V85 Bogenanfang -Bogenmitte [km/h]	< 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	> 20	
DTV [Fz]	< 1'000	1'000 - 3'000	3'000-10'000	> 10'000	> 15'000	
Temperatur [°C]	< 20	20 - 30	> 30			
Strassenzustand [-]	trocken	feucht	nass	andere		
Witterung [-]	schön	bedeckt	Regen	Sonnenblendung	andere	
Lichtverhältnisse [-]	Tag	Dämmerung	Nacht	unbekannt		
Ideal [%]	< 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	...	> 90

Normal [%]	< 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	...	> 90
Korrigieren [%]	< 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	...	> 90
Schneiden [%]	< 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	...	> 90
Ausholen [%]	< 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	...	> 90
Hinaustragen [%]	< 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	...	> 90
Übrige [%]	< 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	...	> 90

Quelle: eigene Darstellung

Mittlere Geschwindigkeit V_m eines einzelnen Fahrzeuges

Die Kategorien der mittleren Geschwindigkeiten V_m eines einzelnen Fahrzeuges werden in drei verschiedene Attribute unterteilt. Die erste mittlere Geschwindigkeit wird in der Zufahrt, d.h. in der Geraden vor der Kurve, die zweite am Kreisbogenanfang und die dritte in der Mitte des Kreisbogens betrachtet. Diese Geschwindigkeiten helfen, das Fahrzeug innerhalb der gesamten gemessenen Fahrzeuge einzuordnen.

V_{85} eines einzelnen Fahrzeuges

Die V_{85} , diejenige Geschwindigkeit, die von 85% der Fahrzeuge nicht überschritten wird, dient dazu, das Geschwindigkeitsniveau einer bestehenden Strasse zu analysieren⁵⁰. Die V_{85} repräsentiert die Gruppe von schnell fahrenden Fahrzeugen. Die Kategorien der V_{85} eines einzelnen Fahrzeuges werden in drei verschiedene Attribute unterteilt. Das erste Attribut ist die V_{85} in der Zufahrt, d.h. in der Geraden vor der Kurve, das zweite die V_{85} am Kreisbogenanfang und das dritte die V_{85} in der Mitte des Kreisbogens. Diese Geschwindigkeiten helfen, das einzelne Fahrzeug im Geschwindigkeitsniveau der Kurve einzuordnen.

⁵⁰ SN 640 210; Entwurf des Strassenraumes; Vorgehen für die Entwicklung von Gestaltungs- und Betriebskonzepten, VSS Zürich, 1999

Geschwindigkeitsdifferenzen

Zu den Attributen der absoluten Geschwindigkeitsdifferenzen gehören einerseits die Differenzen der mittleren Geschwindigkeiten V_m zwischen der Zufahrt und dem Bogenanfang und zwischen dem Bogenanfang und der Bogenmitte. Andererseits werden die analogen Geschwindigkeitsdifferenzen der V_{85} betrachtet. Die V_{85} repräsentiert die Geschwindigkeit der Gruppe von schnell fahrenden Fahrzeugen. Diese Attribute sollen helfen, das vorhandene Geschwindigkeitsniveau in Bezug zur „angemessenen“ Geschwindigkeit in einer Kurve zu ermitteln. Weiter sollen sie auch zeigen, ob die Fahrer im Allgemeinen vor der Kurve stark abbremsen oder ob sie mit konstanter Geschwindigkeit fahren. Die einzelnen Kategorien werden in 5 km/h-Intervalle unterteilt.

Temperatur [°C]

Bei der Pfostenmessung muss jeweils die Temperatur am Messtag angegeben werden, da das Spurprogramm die gemessenen Daten aufgrund der Einflüsse der Temperatur auf die Messsensoren kalibriert. Die Temperatur wird in den drei Kategorien unter 20°, 20° bis 30° und über 30° angegeben.

Strassenzustand [-]

Der Strassenzustand wird in die Kategorien „trocken“, „feucht“, „nass“ und „andere“ unterteilt. In die Kategorie „andere“ fallen Schneematsch, verschneite oder vereiste Strassen und unbekannte Zustände. Diese beeinflussen das Fahrverhalten wahrscheinlich stärker durch physikalische Gegebenheiten als durch die Wahrnehmung des Lenkers und dessen Wahl einer Fahrspur und werden deshalb hier gemeinsam betrachtet.

Witterung [-]

Das Attribut der Witterung wird in fünf Kategorien unterteilt. Die vier ersten Kategorien sind „schön“, „bedeckt“, „Regen“ und „Sonnenblendung“. Es wird angenommen, dass diese das Spurverhalten beeinflussen können. Bei Regen oder Sonnenblendung wird die Fahrweise höchstwahrscheinlich angepasst. In der fünften Kategorie werden die Witterungsverhältnisse

„Schneefall“, „vereisender Regen“, „Hagel“, „Nebel“ sowie „andere“ zusammengefasst. Es ist anzunehmen, dass diese Bedingungen das Spurverhalten nicht nur aufgrund der Sicht, sondern vor allem aufgrund des Strassenzustandes beeinflussen. Dies soll in der vorliegenden Arbeit aber nicht untersucht werden.

Lichtverhältnisse [-]

Es wurde in Studien gefunden, dass unterschiedliche Lichtverhältnisse zu unterschiedlichen Fahrverhalten führen (Knoflacher 1976; Steyvers, De Waard 2000). Die Lichtverhältnisse werden hier in „Tag“ (Tageslicht vorhanden), „Nacht“ (dunkel), „Dämmerung“ (Restlicht vorhanden, Strassenbeleuchtung bereits eingeschaltet) und „unbekannt“ unterteilt.

Spurtypen

In diesen Kategorien wird angegeben, welche %-Anteile die einzelnen Spurtypen am gesamten Spurverhalten aufweisen. Jeder Spurtyp entspricht einem einzelnen Attribut und die Kategorien werden in Intervallen von 10%-Schritten gebildet. In der Abbildung 5-24 sind die einzelnen Bandbreiten, in denen sich die Fahrzeugachsen bewegen können, dargestellt. Die einzelnen Spurtypen sind in Kapitel 1.4 näher beschrieben.

7.2.3. Gruppenbildung für die Attribute der einzelnen Fahrspuren

Die Attribute der einzelnen Fahrspuren beziehen sich auf Eigenschaften, die für ein Fahrzeug während der Kurvenfahrt gelten. Neben Spurtyp, maximaler Geschwindigkeit und maximaler Querbeschleunigung wird auch das Verhältnis der gefahrenen zu den vorhandenen Radien einer Kurve betrachtet. Die entsprechenden Werte je Kategorie sind in Tabelle 7-6 dargestellt. Die Betrachtung der Verhältnisse der gefahrenen zu den vorhandenen Radien soll zeigen, ob bei gewissen Spurtypen vermehrt kleinere oder grössere Radien als der Kurvenradius gefahren werden (vgl. 5.10.15.10).

Tabelle 7-6: Attribute der einzelnen Fahrspuren

Parameter	Kategorien									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spurtyp [-]	Ideal	Normal	Korrigieren	Schneiden	Ausholen	Hinaustragen	Übrige			
Vmax [km/h]	< 40	40 - 45	45 - 50	50 - 55	55 - 60	60 - 65	65 - 70	70 - 75	75 - 80	> 80
Rmin [m]	≤ 45m	45 - 75m	75 - 120m	120 - 175m	175 - 240m	> 240m				
Qmax [m/s ²]	< 3	3 - 6	6 - 9	> 9						
Rmax/Rkurve [-]	< 1	1.0 - 1.25	1.25 - 1.5	1.5 - 1.75	1.75 - 2.0	> 2.0				
Rmin/Rkurve [-]	< 0.5	0.5 - 0.75	0.75 - 1.0	1.0 - 1.25	1.25 - 1.5	1.5 - 1.75	1.75 - 2.0	> 2.0		

Quelle: eigene Darstellung

Spurtyp [-]

Siehe Kapitel 5.10.1

Maximale Geschwindigkeit Vmax [km/h]

Dieses Attribut erfasst die maximal gefahrene Geschwindigkeit eines Fahrzeuges im Bereich der Messung. Die Kategorien sind in Intervalle von 5 km/h unterteilt und reichen von unter 40 km/h bis über 80 km/h.

Minimaler gefahrener Radius Rmin [m]

Je nach Spurtyp besteht die Möglichkeit, dass ein Fahrzeug im Kurvenbereich einen engeren Radius als den projizierten Kurvenradius befährt. Eine Lenkkorrektur könnte z. B zu einem lokal viel kleineren Radius führen. Die Radienkategorien sind dieselben wie in Kapitel 7.3.1 und entsprechen den Minimalradien für die entsprechenden Projektierungsgeschwindigkeiten.

Maximale Querb beschleunigung Q_{max} [m/s^2] im Bereich von R_{min}

Die Querb beschleunigung berechnet sich aus der gefahrenen Geschwindigkeit im Quadrat geteilt durch den Kurvenradius. Maximale Querb beschleunigungen für PW auf trockener Strasse liegen im Bereich von $8m/s^2$ bis $10m/s^2$ (Schmidl 2011). Die Querb beschleunigung zeigt auf, ob der Lenker noch Reserven gegen das Verlassen der Fahrbahn hat. Die vier Kategorien entsprechen Werten von unter $3m/s^2$ bis über $9m/s^2$.

Verhältnis von gefahrenem zu vorhandenem Kurvenradius

Die beiden Attribute “ R_{max}/R_{Kurve} ” und “ R_{min}/R_{Kurve} ” sollen zeigen, welchen Kurvenradius ein Lenker im Verhältnis zum projektierten gefahren ist. Die Kategorien wurden in Intervalle von 0.25 unterteilt.

7.2.4. Gruppenbildung für die Unfallattribute

Zu den Attributen des Unfalls gehören alle Eigenschaften, die direkt mit dem Unfall, dem Unfallverursacher oder der Strassenanlage zu tun haben. Als Beispiel seien hier das Alter des Lenkers, der Unfalltyp oder die Witterung zum Zeitpunkt des Unfalls zu nennen. In der Tabelle 7-7 sind alle Attribute und die entsprechenden Werte je Kategorie dargestellt.

Tabelle 7-7: Attribute je Unfall

Parameter	Kategorien				
	1	2	3	4	5 (...24)
Unfallrichtung [-]	Hin	Gegen			
Kurve (Li/Re) [-]	Linkskurve	Rechtskurve			
Jahr [-]	1997	1998	1999	...	2012
Monat [-]	Januar	Februar	März	...	Dezember
Uhrzeit [Stunde]	0 - 1	1 - 2	2 - 3	...	23 - 24
Wochentag [-]	Montag	Dienstag	Mittwoch	...	Sonntag
# beteiligte Personen [-]	1	2	3	...	> 6
# verletzte Personen [-]	0	1	2	...	> 5
# getötete Personen [-]	0	1	2	...	> 5
Sachschaden [CHF]	< 10'000	< 25'000	> 25'000		
Unfalltyp [-]	01	03	05	06	10, 60, 61
Strassenzustand [-]	trocken	feucht	nass	andere	
Witterung [-]	schön	bedeckt	Regen	Sonnen- blendung	andere
Lichtverhältnisse [-]	Tag	Dämmerung	Nacht	unbekannt	
Alter [Jahre]	18-24	24-35	35-65	>65	
Geschlecht [-]	männlich	weiblich	unbekannt		
Unfallfolge Lenker [-]	nicht verletzt	verletzt	unbekannt		
Dauer Fahrberechtigung [Jahre]	0-1	1-5	5-10	>10	
Sicht [-]	keine Beeinträch- tigung	Sichtbe- hinderung	unbekannt		

Quelle: eigene Darstellung

Unfallrichtung [-]

Bei der Unfallrichtung, aus der ein Unfall entstanden ist, wird in „Hin“ und „Gegen“ unterschieden. „Hin“ ist derjenige Fahrstreifen (resp. Fahrtrichtung), der bei der Pfostenmessung näher bei den Pfosten lag. Dieses Attribut wird verwendet, um die Richtung der Fahrspuren mit den Richtungen der Unfälle abzugleichen.

Kurve (Li/Re) [-]

Wie bei den Kurvenattributen wird angegeben, ob sich ein Unfall in einer Links- oder Rechtskurve (in Fahrtrichtung) ereignet hat.

Jahr [-]

Die Kategorien des Attributes „Jahr“ entsprechen den einzelnen Jahren.

Monat [-]

Die zwölf Kategorien entsprechen den Monaten eines Jahres.

Uhrzeit [Stunde]

Das Attribut der Uhrzeit wurde in volle Stunden unterteilt.

Wochentag [-]

Jeder einzelne Wochentag wird einer Kategorie zugeordnet.

Anzahl beteiligte Personen [-]

Die Anzahl der beteiligten Personen wird zwischen einer Person in Kategorie 1 bis mehr als sechs in Kategorie 7 angegeben.

Anzahl verletzte Personen [-]

Die Anzahl der verletzten Personen wird mit null in Kategorie 1 bis mehr als fünf in Kategorie 7 angegeben.

Anzahl getötete Personen [-]

Die Anzahl der getöteten Personen wird mit null in Kategorie 1 bis mehr als fünf in Kategorie 7 angegeben.

Sachschaden [CHF]

Die Höhe des Sachschadens kann etwas über die Schwere eines Unfalles aussagen. Die Kategorien wird eingeteilt in kleinere Schäden unter 10'000 CHF, Schäden zwischen 10'000 und 25'000 CHF und grosse Schäden oder Totalschäden von mehr als 25'000 CHF.

Unfalltyp [-]

Wie bereits in den Kapiteln 5.3 und 6.2.2 beschrieben, wurden aus der Gesamtheit der Unfalltypen diejenigen Typen ausgewählt, deren Auftreten u.a. mit der Wahrnehmung der Kurve und ihres direkten Umfeldes zu tun haben können. Es wurden sechs Unfalltypen der Kategorie „Schleuder- und Selbstunfall“, ein „Überholunfall“ sowie ein Unfalltyp der Kategorie „Frontalkollision“ ausgewählt (Tab. 6-1). Die Unfalltypen beschreiben zwar die Konfliktsituation, z.B. „Frontalkollision mit Gegenverkehr“, sie unterscheiden aber nicht, ob sich ein Unfall auf der Kurvenausse- oder –innenseite ereignete, ob der Unfall im Bereich des Kurvenanfangs oder eher am Ende passierte.

Strassenzustand [-]

Siehe Kapitel 7.2.2

Witterung [-]

Siehe Kapitel 7.2.2

Lichtverhältnisse [-]

Siehe Kapitel 7.2.2

Alter [Jahre]

Das Alter des Unfallverursachers wurde in Kategorien von 18 bis 24, 24 bis 35, 35 bis 65 und über 65 Jahre eingeteilt. Die erste Kategorie entspricht den Neulenkern mit eher wenig Erfahrung im Strassenverkehr, die zweite und die dritte Kategorie sind routinierte Lenker mit viel bis sehr viel Erfahrung, die vierte Kategorie sind Senioren. Mit dem Alter alleine kann nicht eindeutig auf die Erfahrung eines Lenkers geschlossen werden, da auch die Anzahl der gefahrenen Kilometer eine Rolle spielt. Diese Information ist aus den Unfallaufnahmeprotokollen jedoch nicht ersichtlich.

Geschlecht [-]

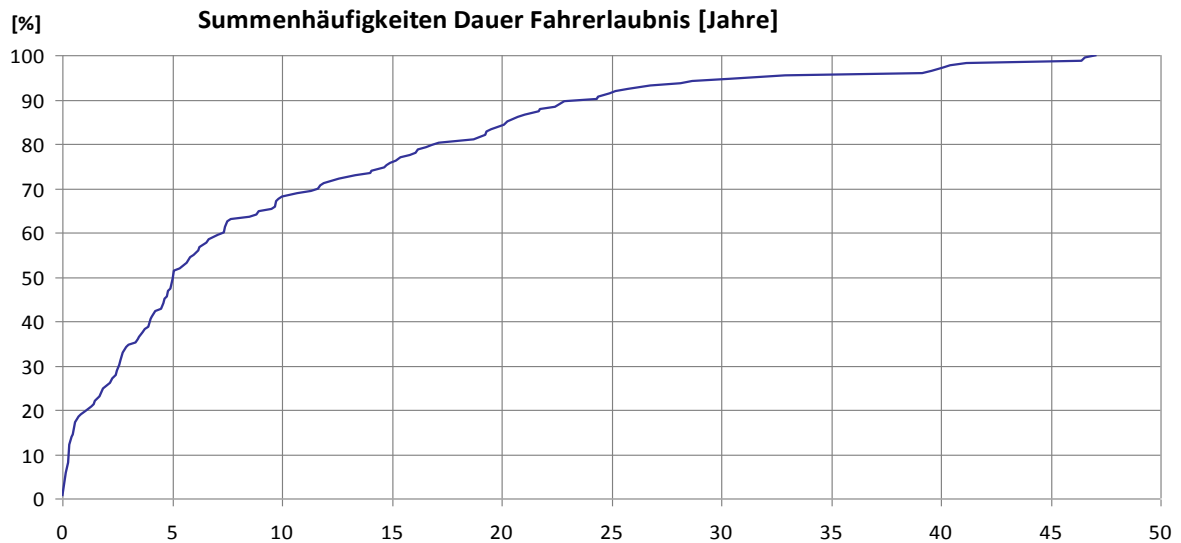
Das Geschlecht des Unfallverursachers ist in die drei Kategorien „männlich“, „weiblich“ oder „unbekannt“, wenn keine Angaben dazu vorliegen, unterteilt.

Unfallfolge Lenker [-]

Aus den Unfallaufnahmeprotokollen geht hervor, ob der unfallverursachende Lenker durch den Unfall verletzt wurde oder nicht. Ev. werden dazu keine Angaben gemacht. Daraus ergeben sich die drei Kategorien „verletzt“, „nicht verletzt“ und „unbekannt“.

Dauer Fahrberechtigung [Jahre]

Die Dauer, die ein Fahrzeuglenker im Besitz einer Fahrberechtigung ist, wurde in vier Kategorien unterteilt. Zur Definition der Intervalle wurden die Unfalldaten des Kantons Aargau untersucht. Die Summenkurve der Angaben der einzelnen Fahrzeuglenker ist in der untenstehenden Abbildung dargestellt (Abb. 7-9). Aus den verschiedenen Steigungen der einzelnen Abschnitte wurden die folgenden Kategorien ermittelt: 0 bis 1 Jahr, 1 bis 5 Jahre, 5 – 10 Jahre und länger als 10 Jahre.

Abbildung 7-9: Dauer Fahrausweisbesitz Unfallverursacher

Quelle: eigene Darstellung aus Unfalldaten Kt. AG

Sicht [-]

Diese Kategorie ist folgendermassen unterteilt: Gab es während des Unfalles eine Beeinträchtigung der Sicht, keine Beeinträchtigung oder ist dieser Faktor nicht bekannt.

7.3. Resultate aus der Auswertung der Unfalldaten

7.3.1. Einleitung

Die Unfalldaten werden nach SN 640 008⁵¹ analysiert. Einige der dort vorgeschlagenen Berechnungen sind hier aufgrund der geringen Unfallzahlen nicht durchführbar bzw. statistisch nicht zulässig. Die Auswertungen sollen zeigen, ob signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Kurven bestehen oder nicht.

⁵¹ SN 640 008 Strassenverkehrsunfälle; Analyse von Unfallzahlen, Unfallstatistiken, Vergleiche und Entwicklungen, VSS Zürich

Weiter werden die Daten mittels Regressionsanalyse und mit einer Rough Set Analyse untersucht. Die Beschreibung der Methoden befindet sich in Kapitel 4.

7.3.2. Methode der kritischen Unfallzahl

Bei der Methode der kritischen Unfallzahl wird das Unfallgeschehen auf einzelnen Abschnitten, hier Messkurven, mit einem Mittelwert aus dem Unfallgeschehen verschiedener Abschnitte verglichen.

Die kritische Unfallzahl⁵² wird wie folgt berechnet:

$$Z_{krit} = \bar{Z} + k\sqrt{\bar{Z}} - \frac{1}{2}$$

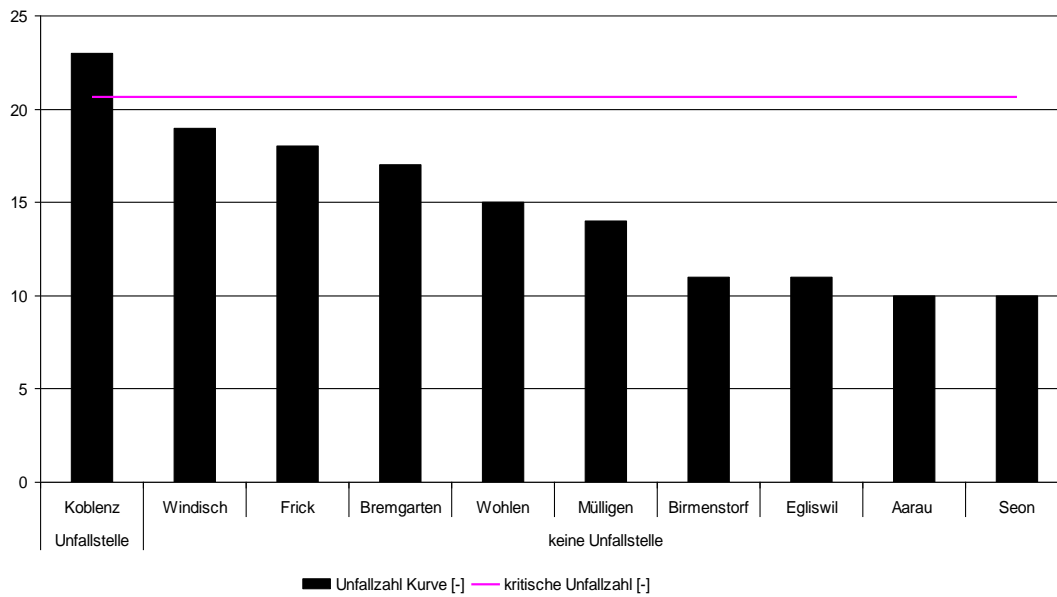
k = 1.645 statistischer Wert bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit

Z_{krit} = kritische Unfallzahl

\bar{Z} = Summe aller Unfälle von Streckenabschnitten dividiert durch die Zahl der Intervalle

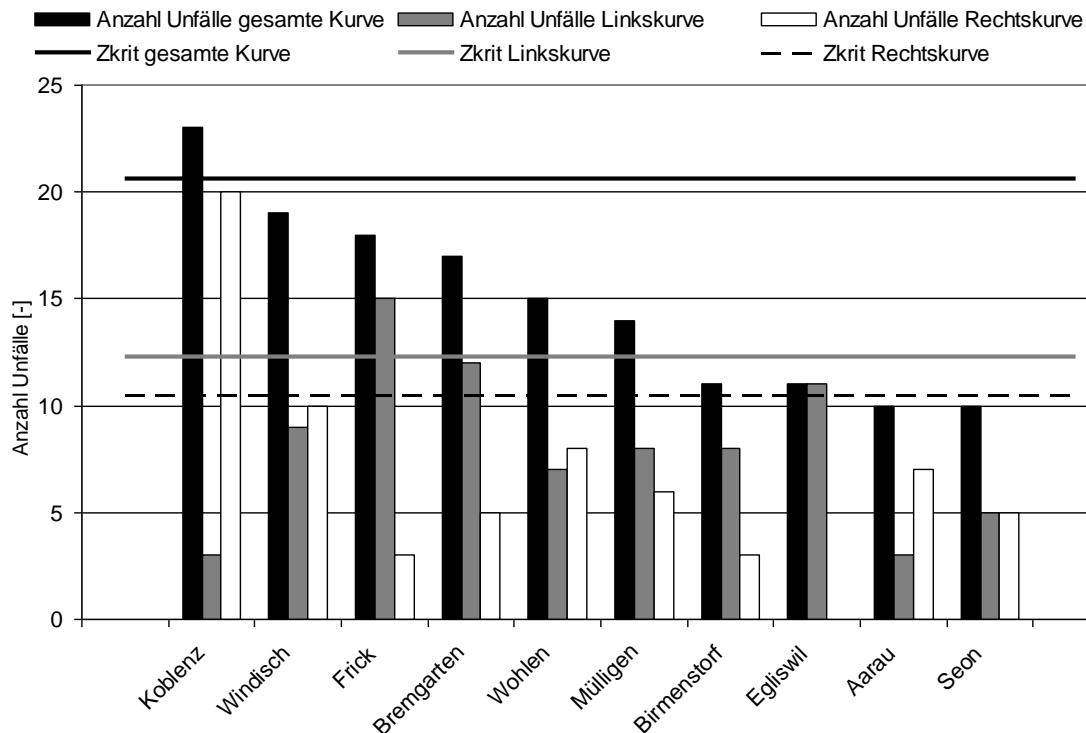
Abbildung 7-10 zeigt die Anzahl Unfälle während einer Periode von zehn Jahren und die kritische Unfallzahl in diesen Kurven. Eine Kurve wird als Unfallstelle definiert, wenn die Zahl der Unfälle die kritische Unfallzahl übersteigt. Es zeigt sich, dass nicht alle untersuchten Kurven Unfallstellen sind und somit zur Auswertung der Unterschiede des Unfallgeschehens in unterschiedlichen Kurven geeignet sind. Die einzige Unfallstelle ist Koblenz, Windisch und Frick liegen knapp unterhalb der Grenze.

⁵² SN 640 009a Strassenverkehrsunfälle; Lokalisierung und Rangierung von Unfallschwerpunkten, VSS Zürich, 2006

Abbildung 7-10: Anzahl Unfälle und kritische Unfallzahl

Quelle: eigene Darstellung

Die Abbildung 7-11 zeigt die kritischen Unfallzahlen getrennt nach Links- und Rechtskurven. In der Stichprobe der Kurven gibt es solche mit gleich verteilten Unfallzahlen in beiden Richtungen, z. B. Windisch oder Wohlen, und solche mit klaren Unterschieden in den beiden Fahrtrichtungen, wie z.B. Koblenz oder Frick. Die Auswahl der Kurven scheint somit geeignet, unterschiedliches Fahrverhalten und Unfallgeschehen zu untersuchen.

Abbildung 7-11: Anzahl Unfälle und kritische Unfallzahlen je Kurve

Quelle: eigene Darstellung

7.3.3. Methode der Unfallraten

Abbildung 7-12 zeigt die Unfallrate der unter 7.3.2 betrachteten Kurven im Kanton Aargau. Im Gegensatz zur Berechnung der kritischen Unfallzahl wird bei der Unfallrate die vorhandene Verkehrsmenge miteinbezogen. Die Unfallrate U_r wird gemäss der untenstehenden Formel⁵³ berechnet:

$$U_{r(i)} = \frac{Z_i \cdot 10^6}{DTV_i \cdot 365 \cdot T \cdot L_i}$$

Z_i = Zahl der Unfälle während einer Zeitperiode T je Intervall i

DTV_i = Durchschnittlicher täglicher Verkehr in Intervall i [Fz]

T = Zeitperiode in Jahren

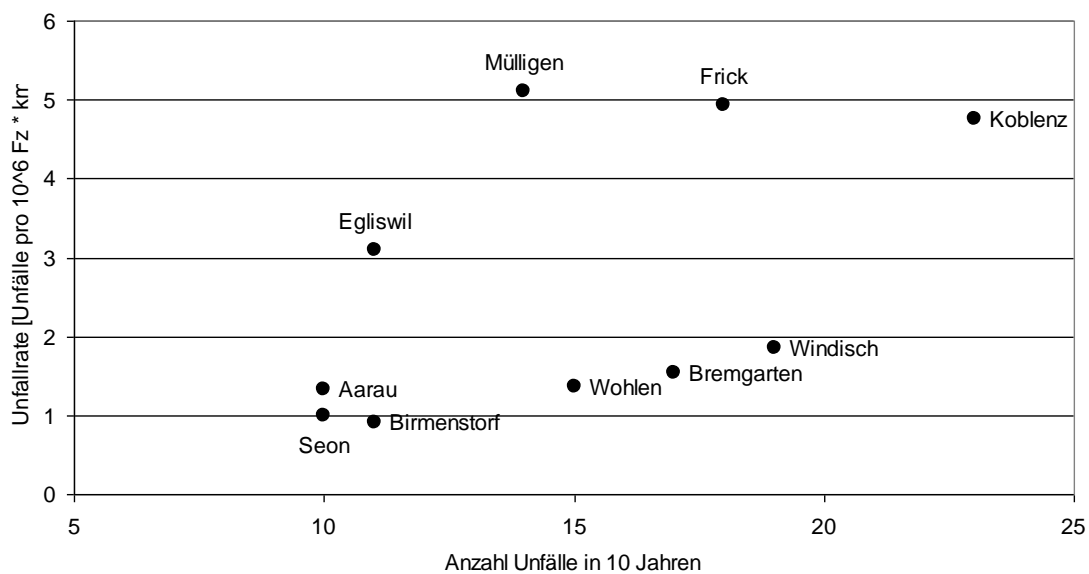
L_i = Länge des Intervalls i [km]

⁵³ SN 640 009a Strassenverkehrsunfälle; Lokalisierung und Rangierung von Unfallschwerpunkten, VSS Zürich, 2006

Die Unfallrate, d. h. die Anzahl Unfälle pro eine Million Fz km, von Kurven, die gemäss Definition keine Unfallstellen sind, kann höher sein als diejenige von Unfallstellen. Je tiefer der DTV, desto stärker wirkt sich die Anzahl der Unfälle auf die Unfallrate aus.

Als Beispiel hierfür zeigt sich Mülligen. Die Unfallzahl liegt unterhalb der kritischen Unfallzahl, die Kurve in Mülligen hat aber die höchste Unfallrate aller in Abbildung 7-12 dargestellten Kurven.

Abbildung 7-12: Unfallrate



Quelle: eigene Darstellung

Fazit:

Die hier betrachteten Kurven weisen eine unterschiedliche Anzahl von Unfällen auf; es sind sowohl Unfallstellen als auch solche, die keine Unfallstellen sind. Weiter sind die Unfallraten verschieden und auch die Anzahl der Unfälle in Links- und Rechtskurven weisen Unterschiede auf.

Die Unfalldaten stammen damit aus Kurven mit unterschiedlichem Unfallgeschehen und sind für die weitere Auswertung geeignet.

7.3.4. Regressionsanalyse der Unfalldaten

Mit einer multiplen linearen Regression wurde untersucht, wie gross der Einfluss der einzelnen Kurvenelemente auf die Variable „Unfalltyp“ ist. Durchgeführt wurde diese Analyse mit dem Statistikprogramm SPSS 21⁵⁴. Als abhängige Variable wurde der Unfalltyp gewählt, als unabhängige Variablen (Einflussfaktoren aus Tab. 7-1) diejenigen in der untenstehenden Tabelle (Tab. 7-8). Die hier nicht berücksichtigten Faktoren aus Tabelle 7-1 waren in den Unfalldaten entweder nicht oder nicht vollständig vorhanden. In der Regressionsanalyse werden die Signifikanz und die Regressionskoeffizienten ermittelt.

Tabelle 7-8: Attribute für die Kovarianzanalyse „Unfalltyp“

Sicht nach innen	Breite in Bogenmitte
Radius	Richtungsänderung
Krümmungsrichtung	Streckencharakteristik
Höchstgeschwindigkeit	Streckentyp
Mittellinie gestrichelt	DTV
Übergangsbogen	Quergefälle in Kurvenmitte
Steigung in Längsrichtung	Sicherheitslinie durchgezogen
Randmarkierung	Breite der Zufahrtsgeraden

Quelle: eigene Darstellung

Die durchgeführte ANOVA⁵⁵ zeigt, dass signifikante Unterschiede (Sig. = .003 < 0.05) zwischen den einzelnen Faktoren bestehen. Sie zeigt aber nicht, zwischen welchen Faktoren diese Unterschiede vorhanden sind (Tab. 7-9).

⁵⁴ IBM SPSS 21,

⁵⁵ ANOVA = Analysis of Variance

Tabelle 7-9: ANOVA „Unfalltyp“

ANOVA ^a					
Modell		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F
1	Regression	155.484	15	10.366	2.518
	Nicht standardisierte Residuen	543.293	132	4.116	
	Gesamt	698.777	147		

a. Abhängige Variable: Unfalltyp

b. Einflußvariablen : (Konstante), Streckentyp, Übergangsbogen, Krümmungsrichtung, Radius, Mittellinie gestrichelt, Höchstgeschwindigkeit, i (ca. +/- %) bzgl. Hinverkehr, Sicht nach innen, Breite der Zufahrtsgeraden, Winkeländerung, Randmarkierung, DTV, p Bogenmitte [%], Streckencharakteristik, Breite in Bogenmitte

Die Tabelle (Tab. 7-10) zeigt die Resultate der linearen Regressionsanalyse. In den ersten beiden Spalten sind der Regressionskoeffizient und dessen Standardfehler dargestellt. Der standardisierte Koeffizient Beta gibt an, wie hoch der Anteil eines Faktors zur Erklärung der Varianz ist. Je grösser dieser Wert ist, desto stärker ist der Einfluss eines Faktors. Die zweitletzte Spalte zeigt das Ergebnis aus dem Signifikanztest (T-Test) mit der Prüfwahl T und der Signifikanz jedes einzelnen Faktors. Werte der Signifikanz von unter 0.05 deuten darauf hin, dass ein signifikanter, d.h. kein zufälliger Unterschied besteht.

Die einzige signifikante Einflussgrösse ist in diesem Modell die „Streckencharakteristik“ (kurvig oder gestreckt). Einen grösseren Einfluss haben daneben auch die „Krümmungsrichtung“, die „Breite der Zufahrtsgeraden“, die „Sicht nach innen“, die „Randmarkierungen“ und der „Streckentyp“. Allerdings unterscheiden sich diese Faktoren nicht signifikant. Ausgeschlossen wurde vom Modell der Faktor „Sicherheitslinie durchgezogen“. Grund dafür ist, dass die hier betrachteten Unfälle mit dem Merkmal „kurvige Strecke“ nie eine durchgezogene Sicherheitslinie haben und umgekehrt, „gerade Strecken“ immer eine durchgezogene Sicherheitslinie aufweisen.

Tabelle 7-10: lineare Regressionsanalyse „Unfalltyp“, Schritt 1

Modell		Koeffizienten ^a				
		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T.	Sig
		Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Beta		
1	(Konstante)	8.953	8.811		1.016	.311
	Radius	-.477	.333	-.233	-1.431	.155
	Krümmungsrichtung	1.017	.715	.233	1.422	.157
	Winkeländerung	.516	.438	.293	1.178	.241
	Übergangsbogen	.320	.687	.072	.465	.643
	Breite der Zufahrtsgeraden	-1.190	.762	-.762	-1.562	.121
	Breite in Bogenmitte	.266	.513	.225	.518	.606
	p Bogenmitte [%]	-.380	.360	-.284	-1.055	.293
	i (ca. +/- %) bzgl. Hinverkehr	-.194	.242	-.125	-.803	.424
	Sicht nach innen	-1.031	.937	-.249	-1.100	.273
	Randmarkierung	2.001	1.350	.375	1.482	.141
	Mittellinie gestrichelt	-.526	1.017	-.115	-.517	.606
	Streckencharakteristik	-4.729	1.841	-.988	-2.568	.011
	DTV	-.125	.798	-.037	-.156	.876
	Höchstgeschwindigkeit	.222	.207	.119	1.075	.284
	Streckentyp	2.810	1.597	.485	1.759	.081

a. Abhängige Variable: Unfalltyp

In einem weiteren Schritt wird das Modell um diejenigen Faktoren reduziert, die in der ersten Analyse keinen grossen Einfluss gezeigt haben. Es sind dies „Übergangsbogen“, „Steigung in Längsrichtung i“ und der „DTV“.

Im Modell in Tabelle 7-11 sind die „Krümmungsrichtung“, die „Breite der Zufahrtsgeraden“, die „Streckencharakteristik“ und der „Streckentyp“ signifikante Einflussgrössen.

Tabelle 7-11: lineare Regressionsanalyse „Unfalltyp“, Schritt 2

Modell		Koeffizienten ^a				
		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T.	Sig
		Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Beta		
1	(Konstante)	10.673	7.265		1.469	.144
	Radius	-.450	.290	-.220	-1.552	.123
	Krümmungsrichtung	1.031	.484	.236	2.132	.035
	Winkeländerung	.629	.383	.357	1.641	.103
	Breite der Zufahrtsgeraden	-1.464	.536	-.938	-2.733	.007
	Breite in Bogenmitte	.517	.325	.438	1.590	.114
	p Bogenmitte [%]	-.450	.312	-.336	-1.441	.152
	Sicht nach innen	-1.430	.749	-.345	-1.909	.058
	Randmarkierung	1.455	1.017	.273	1.431	.155
	Mittellinie gestrichelt	-.834	.896	-.181	-.930	.354
	Streckencharakteristik	-4.495	1.665	-.939	-2.700	.008
	Höchstgeschwindigkeit	.250	.196	.133	1.277	.204
	Streckentyp	2.432	1.214	.419	2.003	.047

a. Abhängige Variable: Unfalltyp

Um die Aussagekraft des Modells zu verbessern, werden in einem nächsten Schritt die „Winkeländerung“, die „Querneigung p in Bogenmitte“, die „Mittellinie gestrichelt“ und die „Höchstgeschwindigkeit“ weggelassen. Die Signifikanz steigt bei den restlichen verwendeten Werten in der Folge an (Tab. 7-12), das Modell wird genauer.

Tabelle 7-12: lineare Regressionsanalyse „Unfalltyp“, Schritt 3

Koeffizienten ^a						
Modell	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T.	Sig	
	Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Beta			
1	(Konstante)	8.967	5.538		1.619	.108
	Radius	-.331	.242	-.162	-1.370	.173
	Krümmungsrichtung	.627	.367	.144	1.710	.089
	Breite der Zufahrtsgeraden	-1.498	.466	-.959	-3.215	.002
	Breite in Bogenmitte	.508	.277	.430	1.832	.069
	Sicht nach innen	-.771	.432	-.186	-1.784	.077
	Randmarkierung	1.602	.955	.300	1.678	.096
	Streckencharakteristik	-3.705	1.314	-.774	-2.819	.006
	Streckentyp	1.845	1.025	.318	1.801	.074

a. Abhängige Variable: Unfalltyp

Im letzten Schritt wurden nur noch die „Breite der Zufahrtsgeraden“ und „in der Bogenmitte“ sowie die „Streckencharakteristik“ betrachtet. Alle drei Faktoren haben einen signifikanten Einfluss auf den Unfalltypen. Den grössten Anteil zur Erklärung der Varianz liefert die „Breite der Zufahrtsgerade“ (Beta = 0.596). Ihr Einfluss ist fast doppelt so gross wie jener der beiden anderen Faktoren (Tab. 7-13).

Tabelle 7-13: lineare Regressionsanalyse „Unfalltyp“, Schritt 4

Koeffizienten ^a						
Modell	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T.	Sig	
	Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Beta			
1	(Konstante)	12.236	2.419		5.058	.000
	Breite der Zufahrtsgeraden	-1.767	.429	-1.132	-4.116	.000
	Breite in Bogenmitte	.704	.248	.596	2.836	.005
	Streckencharakteristik	-3.210	.847	-.671	-3.788	.000

a. Abhängige Variable: Unfalltyp

Fazit:

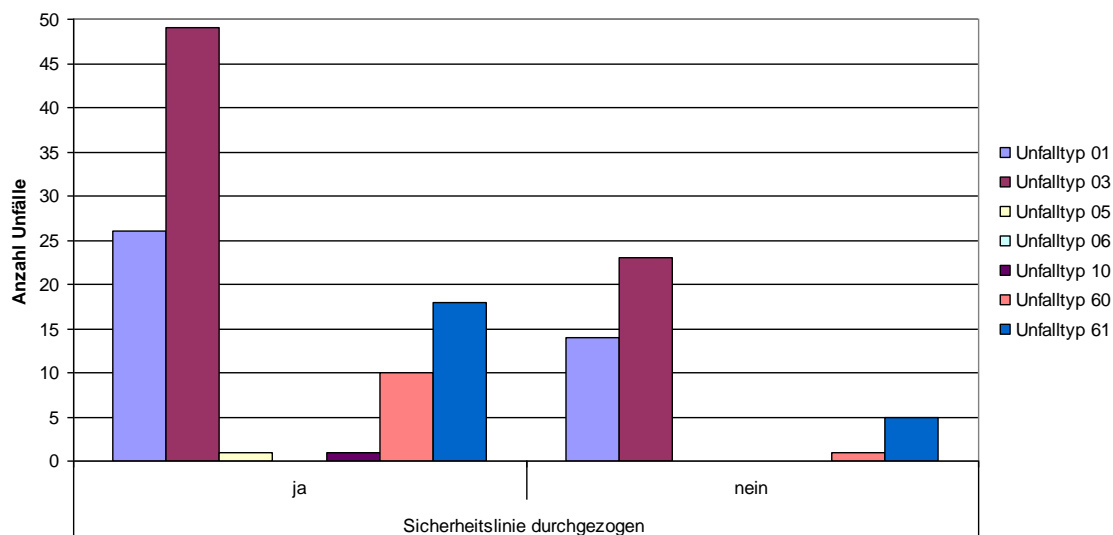
Es zeigt sich, dass nur die Einflussfaktoren „Breite der Zufahrtsgeraden“, „Breite in Bogenmitte“ und die „Streckencharakteristik“ einen signifikanten Einfluss auf den Unfalltypen haben (Tab. 7-13).

Es ist anzunehmen, dass eine breitere Fahrbahn den Fahrern eine grössere Sicherheit vermittelt und in der Folge höhere Geschwindigkeiten gefahren werden. Mit der Streckencharakteristik des zuvor befahrenen Streckenabschnittes wird eine bestimmte Erwartung bezüglich der vorausliegenden Strecke geweckt. Stimmt die Erwartung mit der Realität nicht überein und ermöglichen zudem die Fahrbahnbreiten noch höhere Geschwindigkeiten, so kann die Unfallwahrscheinlichkeit ansteigen.

- **Sicherheitslinie**

In der Abbildung 7-13 wird der Anteil der Unfalltypen in Kurven mit und ohne durchgezogene Sicherheitslinie betrachtet. Die Unfalltypen 5 und 6 (Kollision mit anderem Verkehrsteilnehmer, beim Ausweichen, ohne Kollision) traten in der vorliegenden Stichprobe nur auf, wenn eine Sicherheitslinie vorhanden war. Allgemein ereignen sich zwischen 65 und 100% der Unfälle je Unfalltyp in Kurven mit einer durchgezogenen Sicherheitslinie.

Abbildung 7-13: Unfalltyp und durchgezogene Sicherheitslinie



Unfalltypen und Beschreibung:

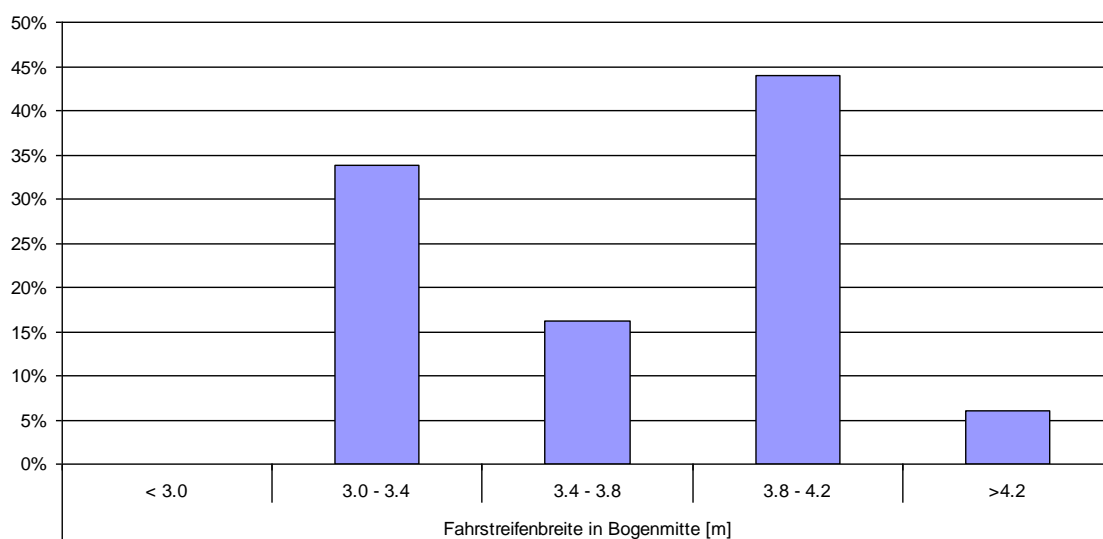
- 01 ohne Kollision
- 03 Kollision mit Hindernis ausserhalb der Fahrbahn
- 05 Kollision mit anderem Verkehrsteilnehmer
- 06 Beim Ausweichen, ohne Kollision
- 10 Kollision mit Gegenverkehr
- 60 Frontalkollision mit Gegenverkehr, ohne Überholen
- 61 Streifen mit Gegenverkehr, ohne Überholen

Quelle: eigene Darstellung

- **Fahrstreifenbreiten**

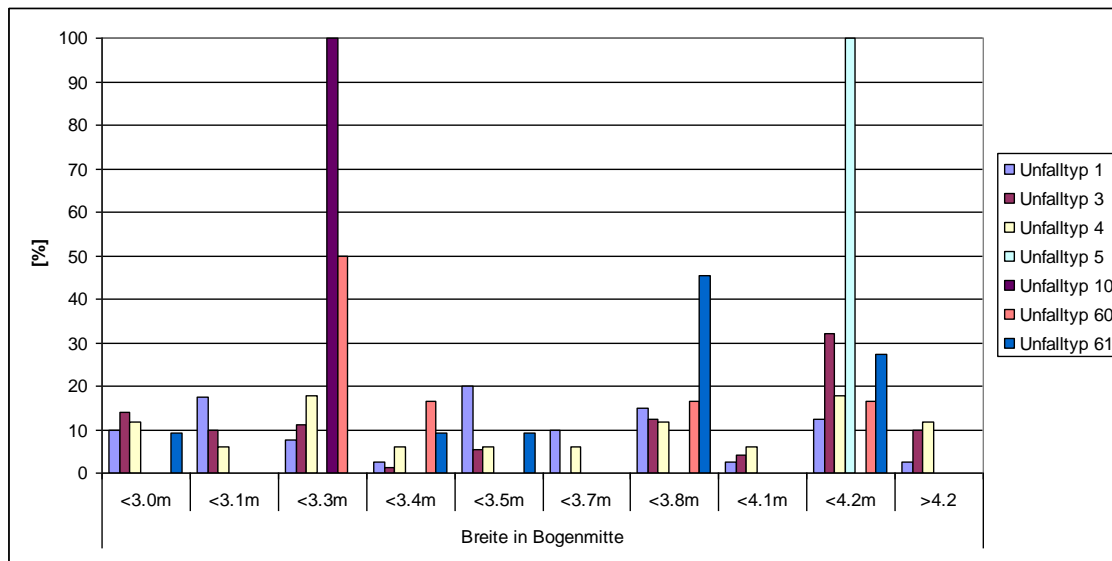
Betrachtet man die gesamten Unfalltypen, so ergibt sich einerseits eine Häufung bei Fahrstreifenbreiten unter 3.4m (knapp 35%) und andererseits eine bei Breiten über 3.8m (fast 45%) (Abb. 7-14).

Abbildung 7-14: Prozentuale Verteilung der Unfälle (alle Unfalltypen) nach Fahrstreifenbreite in Bogenmitte



Quelle: eigene Darstellung

Unterscheidet man zusätzlich nach den einzelnen Unfalltypen (Abb. 7-15), so treten die Unfalltypen 10 und 60 (Kollision mit Gegenverkehr, mit und ohne Überholen) bei Fahrbahnbreiten unter 3.3m, die Unfalltypen 5 und 61 (Ausweichen ohne Kollision und Streifen mit Gegenverkehr ohne Überholen) bei Fahrbahnbreiten über 3.8m auf. Bei schmaleren Fahrbahnen führt also eine ungünstige Spur eher zu einer Kollision, bei breiteren Fahrbahnen ergeben ungünstige Spuren eher Lenkkorrekturen und enden in der Folge mit oder ohne Kontakt mit dem Gegenverkehr in einem Unfall.

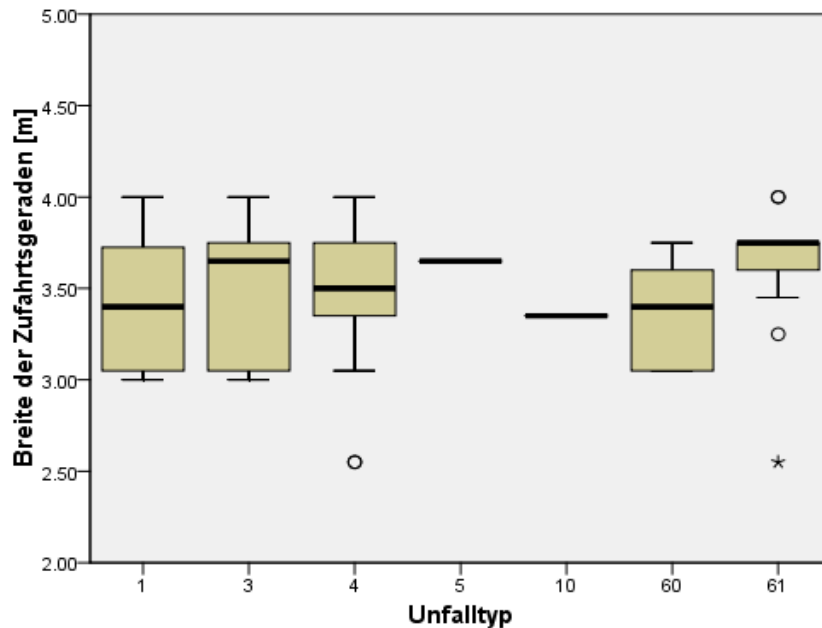
Abbildung 7-15: Unfalltypen und Fahrstreifenbreite in Bogenmitte

Unfalltypen und Beschreibung:

- 01 ohne Kollision
- 03 Kollision mit Hindernis ausserhalb der Fahrbahn
- 04 Kollision mit anderem Verkehrsteilnehmer
- 05 Beim Ausweichen, ohne Kollision
- 10 Kollision mit Gegenverkehr
- 60 Frontalkollision mit Gegenverkehr, ohne Überholen
- 61 Streifen mit Gegenverkehr, ohne Überholen

Quelle: eigene Darstellung

Betrachtet man die Verteilung der Breiten auf der Zufahrtsgeraden und in Bogenmitte getrennt nach Unfalltyp (Abb. 7-16 und 7-17), so zeigt sich, dass der Unfalltyp 01 (ohne Kollision) im Mittel bei kleineren Fahrstreifenbreiten unter 3.5m, die Unfalltypen 03 und 04 (Kollision mit Hindernis ausserhalb der Fahrbahn und Kollision mit anderem Verkehrsteilnehmer) bei Breiten zwischen 3.5m und 4.0m auftritt. Die Unfalltypen 05 und 10 treten in der vorhandenen Stichprobe selten auf.

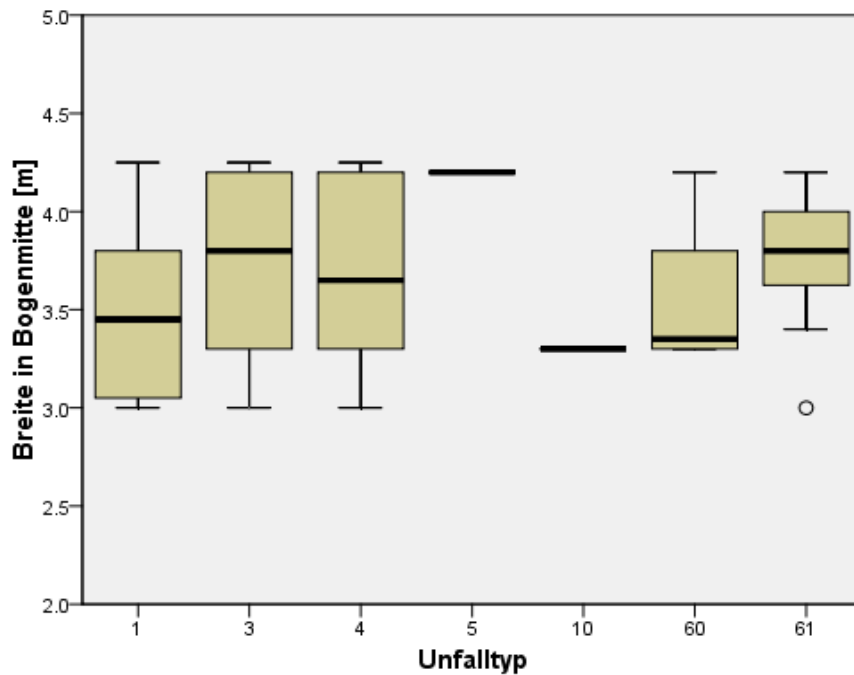
Abbildung 7-16: Unfalltyp und Fahrstreifenbreite auf der Zufahrtsgeraden

Unfalltypen und Beschreibung:

- 01 ohne Kollision
- 03 Kollision mit Hindernis ausserhalb der Fahrbahn
- 04 Kollision mit anderem Verkehrsteilnehmer
- 05 Beim Ausweichen, ohne Kollision
- 10 Kollision mit Gegenverkehr
- 60 Frontalkollision mit Gegenverkehr, ohne Überholen
- 61 Streifen mit Gegenverkehr, ohne Überholen

Quelle: eigene Darstellung

Unterschiede zwischen Breite in der Zufahrtsgeraden und in der Bogenmitte treten z.B. beim Unfalltyp 3 auf. Er ereignet sich in Fahrstreifenbreiten, die in der Zufahrtsgeraden schmaler sind als in der Bogenmitte. Gerade umgekehrt verhält es sich mit dem Unfalltypen 60, er ereignet sich bei schmalere Fahrstreifenbreiten in der Bogenmitte.

Abbildung 7-17: Unfalltyp und Fahrstreifenbreite in Bogenmitte

Unfalltypen und Beschreibung:

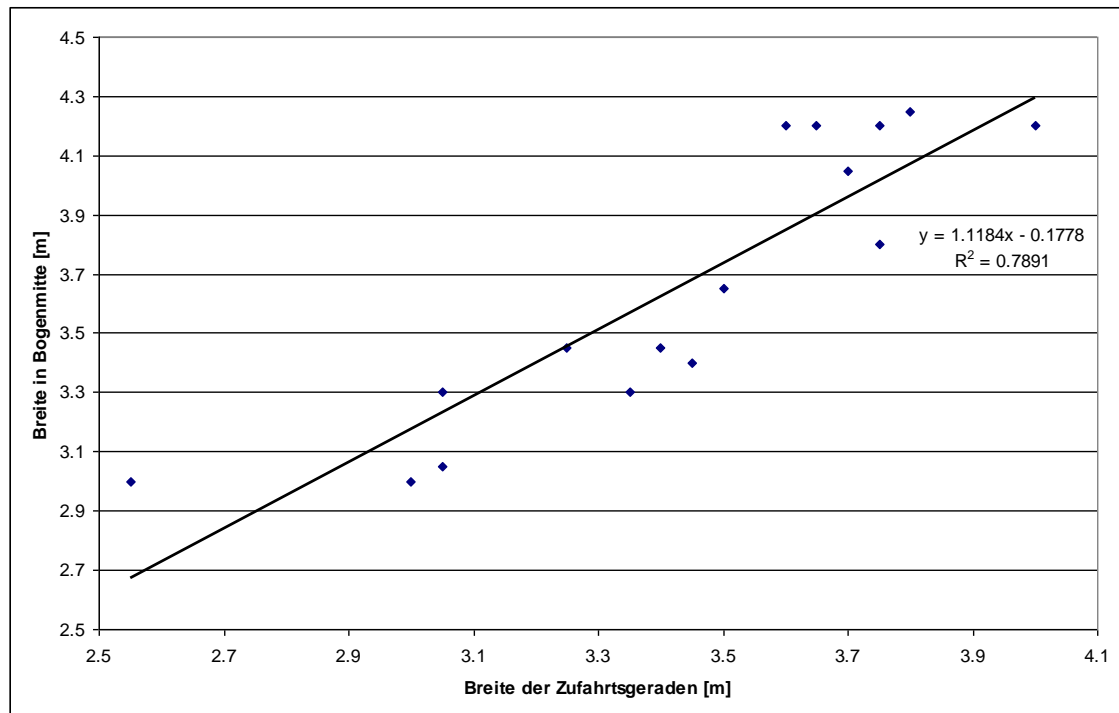
- 01 ohne Kollision
- 03 Kollision mit Hindernis ausserhalb der Fahrbahn
- 04 Kollision mit anderem Verkehrsteilnehmer
- 05 Beim Ausweichen, ohne Kollision
- 10 Kollision mit Gegenverkehr
- 60 Frontalkollision mit Gegenverkehr, ohne Überholen
- 61 Streifen mit Gegenverkehr, ohne Überholen

Quelle: eigene Darstellung

Generell haben Kurven mit einer breiteren Zufahrt auch breitere Fahrbahnen in Kurvenmitte (Abb. 7-18). Dies deutet darauf hin, dass eine gewisse Abhängigkeit zwischen Fahrstreifenbreite und Kurvenort eines Unfalls besteht.

Die Abbildung 7-18 zeigt den Zusammenhang zwischen den Fahrstreifenbreiten in Zufahrtsgeraden und in Bogenmitte.

Abbildung 7-18: Zusammenhang Breite in Bogenmitte und in der Zufahrtsgeraden



Quelle: eigene Darstellung

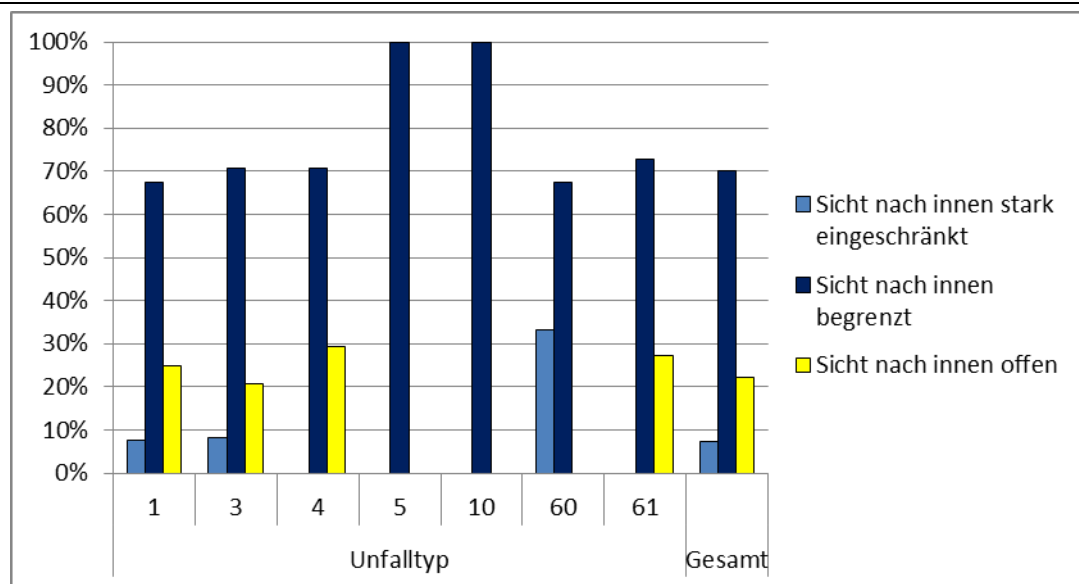
- **Sichtverhältnisse**

Es ist anzunehmen, dass neben der Fahrstreifenbreite noch ein weiterer Einflussfaktor eine Rolle bezüglich Zusammenhangs von Kurvenort und Unfallgeschehen spielt. Ein solcher Faktor könnte die Sichtweite sein. Obwohl die Sichtweite in der Regressionsanalyse kein signifikanter Einflussfaktor war, so ist doch anzunehmen, dass sie einen Einfluss auf das Fahrverhalten und damit auch auf das Unfallgeschehen hat.

Die folgende Abbildung zeigt die Unfalltypenhäufigkeit je nach Sichtweiten nach innen (Abb. 7-19). Die meisten Unfälle ereignen sich bei begrenzter Sicht, d.h. der Lenker sieht vom Beginn des Übergangsbogens maximal bis zur Bogenmitte. Der Unfalltyp 10, Kollision mit Gegenverkehr beim Überholen, tritt nur bei begrenzter Sicht auf, ebenso der Unfalltyp 5. Bei stark eingeschränkter Sicht (Sichtweite maximal bis zum Bogenanfang) treten entweder Schleuder- oder Selbstunfälle (Typ 1 und 3) oder Frontalkollisionen mit dem Gegenverkehr (Typ 60) auf.

Diese Resultate könnten darauf hindeuten, dass eine begrenzte Sicht nach innen den Fahrer dazu verleitet, die Sichtweite zu überschätzen, eine stark eingeschränkte Sicht hat diesen Effekt offenbar nicht, die Gefahrensituation ist offensichtlich.

Abbildung 7-19: Unfalltyp und Sichtverhältnisse



Unfalltypen und Beschreibung:

- 1 ohne Kollision
- 3 Kollision mit Hindernis ausserhalb der Fahrbahn
- 4 Kollision mit anderem Verkehrsteilnehmer
- 5 Beim Ausweichen, ohne Kollision
- 10 Kollision mit Gegenverkehr
- 60 Frontalkollision mit Gegenverkehr, ohne Überholen
- 61 Streifen mit Gegenverkehr, ohne Überholen

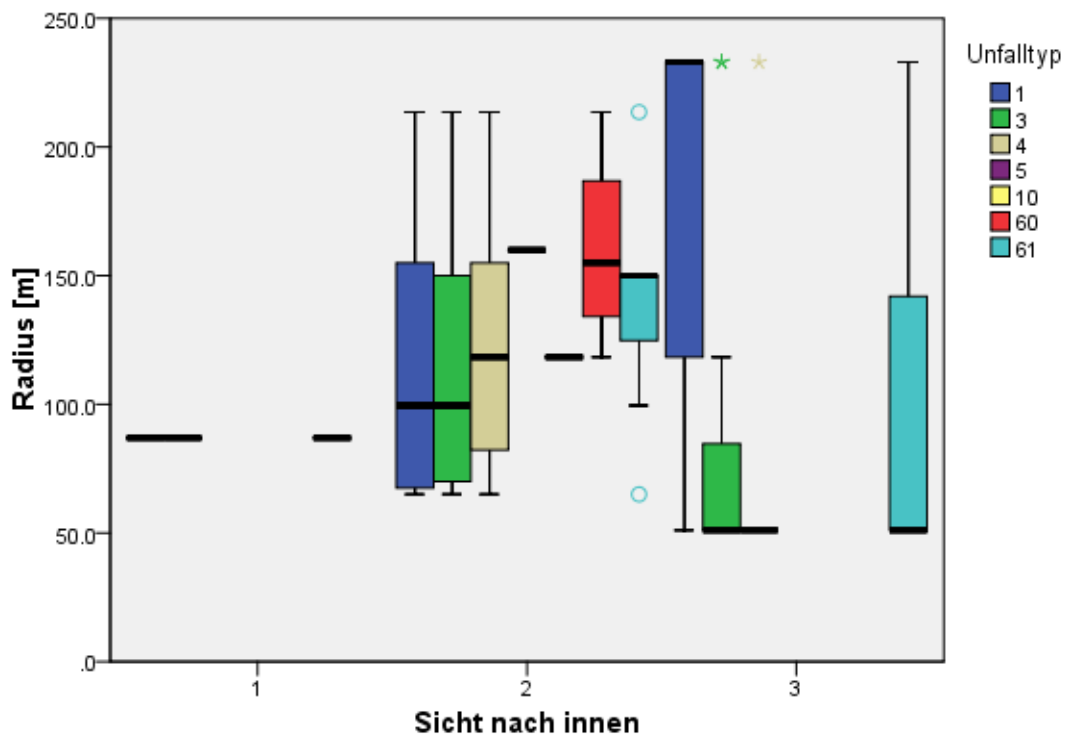
Quelle: eigene Darstellung

• Kurvenradien

Um zu sehen, ob die Sichtweiten einen direkten Zusammenhang mit den Kurvenradien haben, sollen diese beiden Attribute einander gegenüber gestellt werden. Betrachtet man neben der vorhandenen Sichtweite zusätzlich noch die verschiedenen Radien (Abb. 7-20), so gibt es Unfalltypen, die eher bei begrenzter Sicht und kleineren Radien (Unfalltyp 3, Kollision mit

Hindernis ausserhalb der Fahrbahn) oder bei begrenzter Sicht und mittleren Radien (Unfalltyp 61, Streifen mit Gegenverkehr) auftreten und solche, die in Kurven mit offener Sicht und eher höherem mittleren Radius häufiger sind (Typ 1, Schleuder- und Selbstunfall ohne Kollision). Bei den ersten beiden Beispielen könnte eine begrenzte Sicht auf eine Fehleinschätzung der Kurve (Fahrbahnbreite, Krümmung etc.) hindeuten, beim letzten könnte die offene Sicht zu überhöhter Geschwindigkeit verleiten.

Abbildung 7-20: Unfalltyp, Radius und Sichtverhältnisse



Sicht nach innen:

- 1 stark eingeschränkt
- 2 begrenzt
- 3 offen

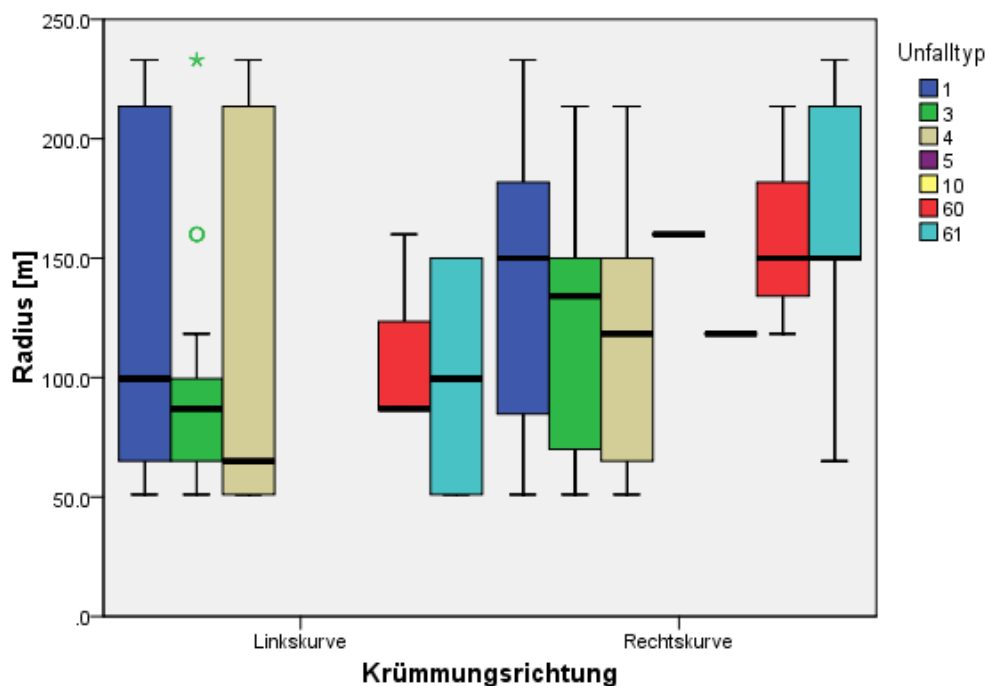
Unfalltypen und Beschreibung:

- 1 ohne Kollision
- 3 Kollision mit Hindernis ausserhalb der Fahrbahn
- 4 Kollision mit anderem Verkehrsteilnehmer
- 5 Beim Ausweichen, ohne Kollision
- 10 Kollision mit Gegenverkehr
- 60 Frontalkollision mit Gegenverkehr, ohne Überholen
- 61 Streifen mit Gegenverkehr, ohne Überholen

Quelle: eigene Darstellung

Die untenstehende Abbildung (Abb. 7-21) zeigt die Boxplots der Unfalltypen, aufgetragen nach Krümmungsrichtung und Radius. Die Unfälle in Linkskurven treten bei tieferen mittleren Radien häufiger auf als in Rechtskurven. Die Bandbreite der Radien, bei denen sich Schleuder- und Selbstunfälle (Unfalltyp 1) ereignen, ist in Linkskurven ebenfalls grösser als in Rechtskurven. In Linkskurven mit einem Radius von unter 120m, d.h. mit einer Projektierungsgeschwindigkeit von unter 60 km/h, sind Unfälle offenbar häufiger als in vergleichbaren Rechtskurven. Die Gegenfahrbahn in Linkskurven könnte u.U. eine ungünstige optische Linienführung aufzeigen und in der Folge zu erhöhten Geschwindigkeiten verleiten.

Abbildung 7-21: Unfalltyp, Radius und Krümmungsrichtung



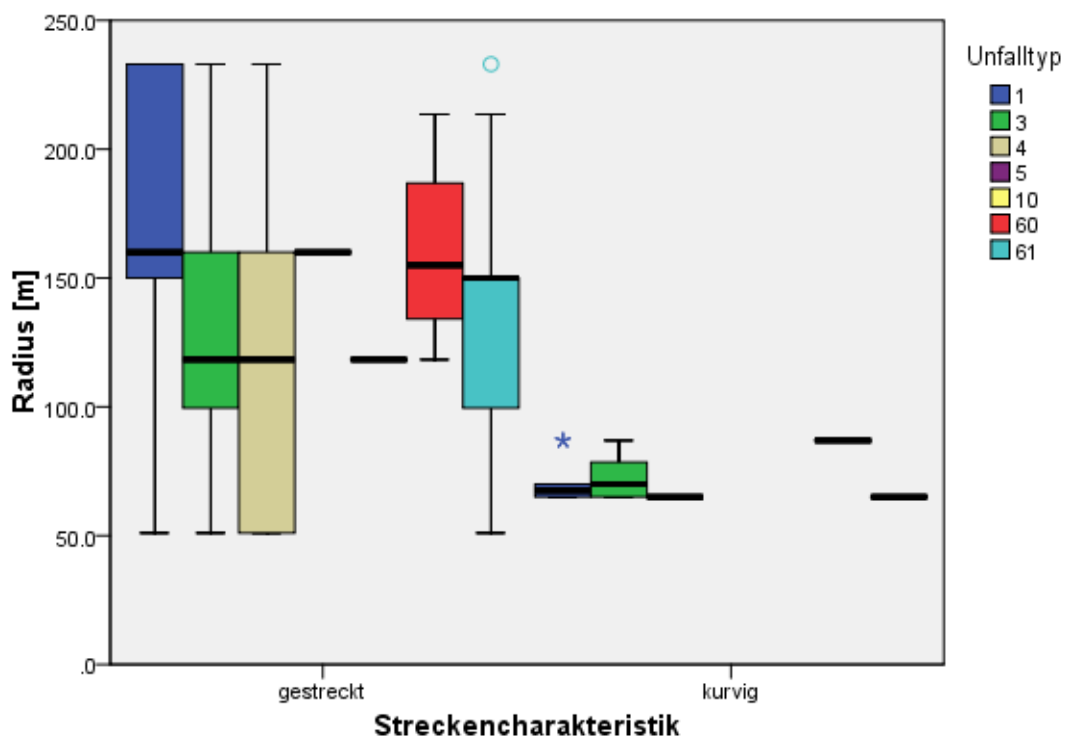
Unfalltypen und Beschreibung:

- 1 ohne Kollision
- 3 Kollision mit Hindernis ausserhalb der Fahrbahn
- 4 Kollision mit anderem Verkehrsteilnehmer
- 5 Beim Ausweichen, ohne Kollision
- 10 Kollision mit Gegenverkehr
- 60 Frontalkollision mit Gegenverkehr, ohne Überholen
- 61 Streifen mit Gegenverkehr, ohne Überholen

Quelle: eigene Darstellung

Die folgende Abbildung (Abb. 7-22) zeigt die Unfalltypen aufgeteilt nach den beiden Streckencharakteristiken „gestreckt“ und „kurvig“. Die grosse Mehrheit der Unfälle aller Unfalltypen tritt auf gestreckten Strecken auf, d.h. in Kurven, denen eine relativ gerade Strecke vorausgeht. Die Fahrer erwarten möglicherweise aufgrund des zuvor befahrenen Streckenabschnittes keine enge Kurve und wählen wegen eines subjektiv hohen Sicherheitsempfindens eine zu hohe Geschwindigkeit.

Abbildung 7-22: Unfalltyp, Radius und Streckencharakteristik



Unfalltypen und Beschreibung:

- 1 ohne Kollision
- 3 Kollision mit Hindernis ausserhalb der Fahrbahn
- 4 Kollision mit anderem Verkehrsteilnehmer
- 5 Beim Ausweichen, ohne Kollision
- 10 Kollision mit Gegenverkehr
- 60 Frontalkollision mit Gegenverkehr, ohne Überholen
- 61 Streifen mit Gegenverkehr, ohne Überholen

Quelle: eigene Darstellung

7.3.5. Resultate der Rough Set Analyse

Bei der Auswertung mittels Rough Set Analyse konnten die Unfalldaten mit 31 Regeln und sechs Attributen beschrieben werden (Abb. 7-23). Es sind dies Strassenbeleuchtung, Krümmungsrichtung, Radius, Kurvenlage, Höchstgeschwindigkeit und Quergefälle p in Bogenmitte. Auffällig ist, dass keines der signifikanten Attribute aus der Regressionsanalyse in den Regeln der Rough Set Analyse erscheint.

Die Regel mit dem grössten Support, d.h. mit der grössten Anzahl der mit dieser Regel erklärbaren Unfälle, ist Regel Nr. 8 mit vierzehn Unfällen, gefolgt von Regel Nr. 21 mit elf Unfällen und Regel Nr. 7 mit neun Unfällen. Alle drei Regeln gelten für Strassen ohne Beleuchtung. Die drei Regeln haben folgende Ausprägung der Attribute.

- Regel Nr. 8: Linkskurve, Radius $< 120\text{m}$, Wald oder einseitige Vegetation, 80 km/h, Quergefälle in Bogenmitte 5-6%.
- Regel Nr. 7: Linkskurve, Radius $< 120\text{m}$, Wald oder einseitige Vegetation, 80 km/h, Quergefälle in Bogenmitte $< 3\%$.
- Regel Nr. 21: Rechtskurve, Radius $\geq 120\text{m}$, freies Feld, 50 km/h, Quergefälle in Bogenmitte $> 7\%$.

Auffallend ist bei allen drei Regeln, dass der vorhandene Kurvenradius nicht für die zulässige Höchstgeschwindigkeit geplant ist. Bei 80 km/h müsste der Radius mindestens 240m betragen, für 50 km/h hingegen würden 75m bereits ausreichen. Das könnte darauf hindeuten, dass die Kurve von den Fahrzeuglenkern falsch eingeschätzt wird.

Abbildung 7-23: Übersicht der Regeln Rough Set Algorithmus „Unfalltyp“

Regel Nr.	Strassenbeleuchtung	Krümmungsrichtung	Radius	Kurvenlage	Höchstgeschwindigkeit	p in Bogenmitte	LHS Support, "rule strength"		
1	keine	Linkskurve	<120m	freies Feld	60	>7%	2		
2					80		3		
3				Wald oder einseitige Vegetation	50	60	3-4%	2	
4							5-6%	8	
5					80	60	6-7%	1	
6							<3%	8	
7					5-6%	80	60	<3%	9
8								5-6%	14
9			6-7%	4					
10			>=120m	Rechtskurve	freies Feld	50	80	>7%	1
11								3-4%	5
12					Wald oder einseitige Vegetation	60	60	>7%	2
13								5-6%	7
14					80	60	60	6-7%	8
15		>7%						1	
16		<120m	Rechtskurve	freies Feld	60	80	>7%	7	
17							6-7%	6	
18				Wald oder einseitige Vegetation	60	60	>7%	4	
19							5-6%	3	
20				80	60	60	>7%	1	
21							>7%	11	
22		>=120m	Rechtskurve	freies Feld	50	80	>7%	1	
23							3-4%	5	
24				Wald oder einseitige Vegetation	60	60	>7%	8	
25							5-6%	8	
26				80	60	60	6-7%	3	
27	>7%						4		
28	durchgehend	Linkskurve	<120m	freies Feld	60	>7%	3		
29	andere	Rechtskurve	<120m	freies Feld	60	>7%	3		
30		Linkskurve	<120m	freies Feld	60	>7%	5		
31	andere	Rechtskurve	<120m	freies Feld	80	>7%	1		
Anzahl Unfälle							148		

Quelle: eigene Darstellung

Die drei Regeln mit dem höchsten Support können zusammen 23% der Unfälle beschreiben. Nimmt man noch diejenigen Regeln dazu, die mindestens acht Unfälle beschreiben, so ergeben sich acht Regeln, die insgesamt 50% der Unfälle abdecken (Tab. 7-14).

Tabelle 7-14: Anzahl Regeln und Anzahl Unfälle Rough Set Algorithmus

Anzahl Regeln	in %	Anzahl Unfälle	in %
3	10%	34	23%
8	26%	74	50%
31	100%	148	100%

Quelle: eigene Darstellung

Die folgende Tabelle (Tab. 7-15) zeigt die Häufigkeiten der einzelnen Unfalltypen je Regel. Sie zeigt auch, dass v.a. Unfälle des Typs 01 und 03 sowie 60 und 61 auftreten. Zum Beispiel sind 33% der Unfälle der Regel Nr. 2 und 100% der Regel Nr. 5 vom Unfalltyp 01.

Tabelle 7-15: Rough Set Analyse, Unfalltyp Accuracy

Regel Nr.	Unfalltyp accuracy						
	01	03	05	06	10	60	61
1						100%	
2	33%	67%					
3		100%					
4	25%	75%					
5	100%						
6	25%	75%					
7	33%	44%					22%
8	43%	50%					7%
9		75%				25%	
10	100%						
11	80%						20%
12						100%	
13	29%	57%					14%
14	63%	25%					13%
15	100%						
16		29%			14%		57%
17	33%	67%					
18	25%	50%					25%
19						33%	67%
20		100%					
21	18%	45%				18%	18%
22		100%					
23	20%	20%				20%	40%
24	38%	38%				13%	13%
25		75%	13%				13%
26	67%					33%	
27	25%	75%					
28		100%					
29		33%					67%
30		80%					20%
31							100%
Anzahl Unfälle	40	72	1	0	1	11	23

Quelle: eigene Darstellung

Die untenstehende Tabelle zeigt (Tab. 7-16), wie viel Prozent aller Unfälle eine Regel beschreiben kann. In den Spalten unterhalb der Unfalltypen geben die jeweiligen Prozentzahlen an, wie viel Prozent der Unfälle, die zum Unfalltyp gehören, einer Regel zugeordnet werden können. Beispielsweise sind in Regel Nr. 8 15% der Unfälle des Typs 01. Insgesamt hat die Regel Nr. 8 einen Anteil am Unfallgeschehen von 9.5%.

Tabelle 7-16: Rough Set Analyse, Unfalltyp Coverage

Regel Nr.	Unfalltyp coverage							Cov.*
	01	03	05	06	10	60	61	
1						18%		1.35%
2	3%	3%						2.03%
3		3%						1.35%
4	5%	8%						5.41%
5	3%							0.68%
6	5%	8%						5.41%
7	8%	6%					9%	6.08%
8	15%	10%					4%	9.46%
9		4%				9%		2.70%
10	3%							0.68%
11	10%						4%	3.38%
12						18%		1.35%
13	5%	6%					4%	4.73%
14	13%	3%					4%	5.41%
15	3%							0.68%
16		3%			100%		17%	4.73%
17	5%	6%						4.05%
18	3%	3%					4%	2.70%
19						9%	9%	2.03%
20		1%						0.68%
21	5%	7%				18%	9%	7.43%
22		1%						0.68%
23	7%	1%				9%	9%	3.38%
24	8%	4%				9%	4%	5.41%
25		8%	100%				4%	5.41%
26	5%					9%		2.03%
27	3%	4%						2.70%
28		4%						2.03%
29		1%					9%	2.03%
30		6%					4%	3.38%
31							4%	0.68%
	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%

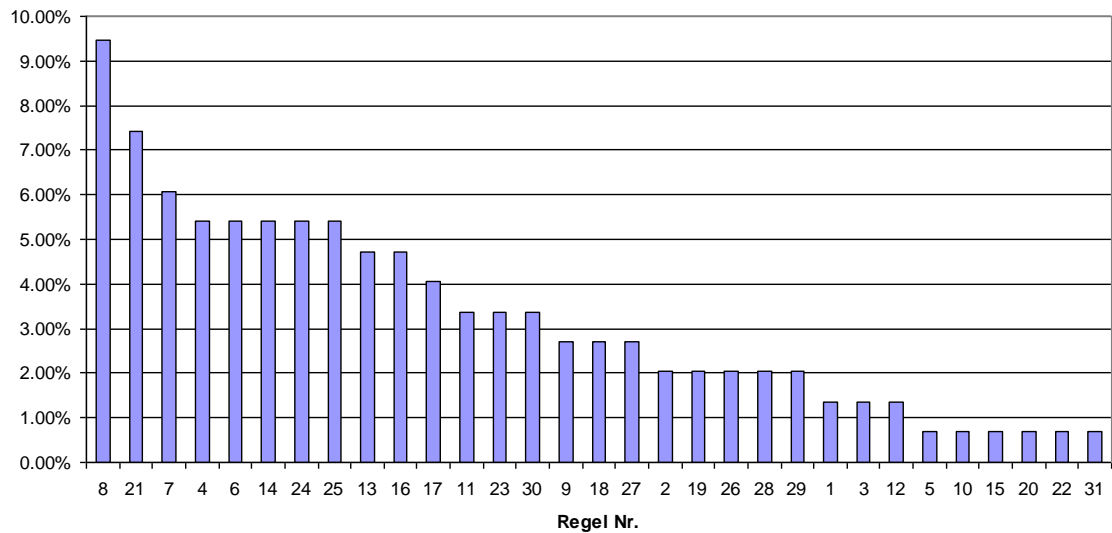
* Die Coverage gibt an, wie viel Prozent aller Unfälle mit einer Regel beschrieben werden können

Quelle: eigene Darstellung

Die Auswertung der Unfalldaten mit der Rough Set Analyse zeigt, dass es sehr viele Regeln braucht, um alle Unfälle zu beschreiben (Abb. 7-24). Sie zeigt aber auch, dass mit nur drei Regeln fast ein Viertel der hier betrachteten

Unfälle beschrieben werden kann. Einige Regeln erklären nur 2% resp. 3 Unfälle.

Abbildung 7-24: Coverage der Regeln Rough Set Algorithmus „Unfalltyp“



Quelle: eigene Darstellung

Die Rough Set Auswertung konnte zeigen, dass es einige Einflussfaktoren gibt, die viele der hier betrachteten Unfälle gemeinsam haben. Es sind dies z.B. die Krümmungsrichtung (eher Linkskurven), Radius (< 120m) und einseitige Vegetation oder Rechtskurven mit grossem Radius und tiefer zulässiger Geschwindigkeit. Die Rough Set Analyse scheint also geeignet, gewisse Gesetzmässigkeiten aufzuzeigen.

7.3.6. Fazit zu den Resultaten aus den Unfalldaten

Aufgrund der Auswertung der empirischen Unfalldaten konnten erste Erkenntnisse gewonnen werden und einige Aussagen aus der Literaturrecherche überprüft werden.

Resultate Regressionsanalyse vs. Resultate Rough Set Algorithmus

Obwohl für die Regressionsanalyse und die Auswertung mittels Rough Set Algorithmus das gleiche Datensample verwendet wurde, sind die gefundenen Einflussfaktoren auf das Unfallgeschehen unterschiedlich.

Auf der einen Seite wurden mit der Regressionsanalyse signifikante Einflussfaktoren definiert. Sie zeigen, welche Faktoren den grössten nicht-zufälligen Einfluss auf das Unfallgeschehen haben.

Auf der anderen Seite steht die Rough Set Analyse, mit der versucht wird, Regeln zu definieren, die die Gesamtheit aller Unfälle beschreiben können. Es werden also Faktoren gesucht, die bei allen Unfällen, wenn auch nicht unbedingt einen grossen, aber dennoch einen Einfluss haben.

Die gefundenen Einflussfaktoren sind in der Tabelle 7-17 dargestellt.

Tabelle 7-17: Einflussfaktoren Unfalltyp

Methode	Gefundene Einflussfaktoren der Kurven auf das Unfallgeschehen
Regressionsanalyse	Breite der Zufahrtsgeraden, Breite in Bogenmitte und die Streckencharakteristik
Rough Set Analyse	Strassenbeleuchtung, Krümmungsrichtung, Radius, Kurvenlage, Höchstgeschwindigkeit und Quergefälle p in Bogenmitte

Quelle: eigene Darstellung

In den beiden Analysen wurden komplett unterschiedliche Einflussfaktoren gefunden. Grund dafür könnten die unterschiedlichen Herangehensweisen der Methoden sein. Mit der Regressionsanalyse werden Faktoren gesucht, die

einen signifikanten Einfluss haben, die Rough Set Analyse hingegen sucht Faktoren, mit denen Regeln für alle Unfälle erstellt werden können, d.h. auch für Unfälle, die nur einmal mit einer bestimmten Konstellation von Faktoren auftreten. Weitere Ursachen könnten in der relativ kleinen Stichprobe oder in den ev. zu detailliert gewählten Attributkategorien liegen.

Resultate vs. Literaturrecherche (vgl. Kapitel 2)

Weitere Auswertungen der Unfalldaten haben die folgenden Erkenntnisse gebracht:

- Es ereignen sich mehr Unfälle in Kurven mit einer durchgezogenen Sicherheitslinie als ohne (vgl. Abb. 7-13).

In der Literatur wird der grösste visuelle Unterschied einer Strasse mit Mittelmarkierung zu einer Strasse ohne Mittelmarkierung beschrieben (de Waard, Steyvers et al. 2004), zusätzliche Markierungen erhöhen zudem die subjektive Sicherheit (Rudinger, Holte 1994). Zu den gefahrenen Geschwindigkeiten machten Steyvers (Steyvers, De Waard 2000) und Weise (Weise, Steyer 1999) widersprüchliche Aussagen. Steyvers beobachtete höhere Geschwindigkeiten nach dem Anbringen einer Mittellinie, Weise hingegen verwarf die Hypothese, dass eine Mittellinie zu höheren Geschwindigkeiten führen würde. Obwohl Coutton-Jean (Coutton-Jean, Mestre et al. 2009) und Knoflacher (Knoflacher 1976) schreiben, dass ein Fahrzeuglenker sein Steuerverhalten nicht mit Hilfe der Fahrbahnmitte regelt, könnte aufgrund des grösseren relativen Anteils an Unfällen in Kurven mit Sicherheitslinie darauf geschlossen werden, dass die Sicherheitslinie möglicherweise zu höheren Geschwindigkeiten führt. Weiter ist anzunehmen, dass die Sichtverhältnisse in Kurven mit Sicherheitslinien weniger gut sind als in Kurven ohne Linie.

- Sehr schmale oder sehr breite Fahrstreifenbreiten wirken sich negativ auf die Unfallhäufigkeit aus (vgl. Abb. 7-14).

In der Literatur wurde festgestellt, dass Fahrzeuglenker auf einer Strecke mit einer Fahrbahnbreite von 6m ihre Geschwindigkeit im Mittel um 15.6% überschätzten, auf einer Strecke mit 6.5m Fahrbahnbreite hingegen im Mittel um 6.3% unterschätzten (Köppel, Bock 1979). Diese Unterschätzung der Geschwindigkeit könnte eine Ursache für eine erhöhte Unfallhäufigkeit

sein. Weiter sind breitere Fahrbahnen wahrscheinlich übersichtlicher und verleiten so eher zu höheren Geschwindigkeiten.

Auf schmalen Fahrbahnen haben Lenkfehler schneller negative Folgen, weil der Raum und die Zeit, um angemessen reagieren zu können, fehlen.

- Die meisten Unfälle ereignen sich bei begrenzter Sicht, d.h. der Lenker sieht vom Beginn des Übergangsbogens maximal bis zur Bogenmitte (vgl. Abb. 7-19).

Eine Untersuchung von Land und Horwood (Land, Michael, Horwood 1995) zeigte, dass sowohl nahe als auch entfernte Bereiche vor dem Fahrzeug zur Bestimmung der Spurposition benötigt werden. Wenn die entfernten Bereiche einer Strasse nicht oder zu spät erkennbar sind, so kann die Strassenkrümmung schlecht abgeschätzt werden, was u. U. zu einem ungünstigen Lenkverhalten führen kann und dieses könnte wiederum eine Ursache für Unfälle sein.

- Die Mehrheit der Unfälle aller Unfalltypen tritt auf gestreckten Strecken auf, d.h. in Kurven, denen eine relativ gerade Strecke vorausgeht (vgl. Abb. 7-22).

Elvik erwähnt eine Studie von Matthews und Barnes von 1988, die zeigt, dass die Unfallraten in Kurven mit Radien kleiner 200m markant ansteigen, wenn solche Kurven auf einer Strecke weniger oft auftreten. Erwartet ein Fahrer aber Kurven mit Radien kleiner 200m, was einer Projektierungsgeschwindigkeit unter 80 km/h entspricht, so erfolgt kein Anstieg der Unfallraten (Elvik 2006). Anhand der in der vorliegenden Arbeit untersuchten Unfälle ist anzunehmen, dass die Wahrnehmung einer Strecke eine grosse Rolle spielt, und die Resultate von Elvik bestätigt werden können.

- Der Unfalltyp 03, „Kollision mit Hindernis ausserhalb der Fahrbahn“ tritt eher bei kleineren Radien und begrenzter Sicht auf. Der Unfalltyp 01, „Schleuder- und Selbstunfall ohne Kollision“ ereignet sich häufiger in Kurven mit offener Sicht und eher höherem mittleren Radius, offenbar als Folge erhöhter Geschwindigkeiten (vgl. Abb. 7-22).
- Gerade umgekehrt verhält es sich mit dem Unfalltypen 61, „Streifen mit Gegenverkehr“, der bei begrenzter Sicht und höheren mittleren Radien,

bei offener Sicht bei kleineren mittleren Radien, auftritt (vgl. Abb. 7-22).

Zu den Unfalltypen, wie sie in der Schweiz definiert sind, wurden in der Literatur keine Studien gefunden. Es ist aber anzunehmen, dass die Sichtweiten einen Zusammenhang mit der gefahrenen Geschwindigkeit haben und diese wiederum mit dem Unfalltypen.

Resultate vs. Hypothesen

Aus der vorliegenden Unfallanalyse können bezüglich der Hypothesen (vgl. Kapitel 3) folgende erste Erkenntnisse gewonnen werden.

→ *Es gibt Elemente einer Kurve, die sowohl das Auftreten bestimmter Unfalltypen als auch das Vorhandensein bestimmter Spurtypen signifikant beeinflussen.*

Ja, es sind dies die Fahrbahnbreiten und das Vorhandensein einer Sicherheitslinie. Das Ausmass der Richtungsänderung spielt für Unfälle keine Rolle.

→ *Das Spurverhalten in einer Kurve entlang einer inhomogenen Strecke unterscheidet sich vom Spurverhalten in einer Kurve entlang einer homogen trassierten Strecke.*

Wenn man davon ausgeht, dass das Spurverhalten und das Unfallgeschehen einen Zusammenhang haben, dann stimmt obige Hypothese insofern, als dass Unfälle vermehrt in Einzelkurven nach längeren geraden Streckenabschnitten auftreten.

→ *Das Spurverhalten einer Kurve mit Mittel-, aber ohne Randlinie unterscheidet sich signifikant von demjenigen einer Kurve mit Rand- und Mittellinien.*

Diese Hypothese kann nicht beantwortet werden, da die Angaben zu den Randlinien in den Unfalldaten nicht vorhanden waren.

Resultate vs. Fehlerbaum (Netzdiagramm und Gefährdungsindex)

Für die Verfeinerung der Berechnung des Indexes für die Gefährdung in einer Kurve (Kap. 5.10.4) sind mit den Erkenntnissen aus der Unfalldatenauswertung (Kap. 7.3) möglicherweise Gewichtungen für einzelne Faktoren in Betracht zu ziehen (Tab.7-18). V.a. für die Faktoren der Fahrbahnbreiten, der Streckencharakteristik, des Radius und allenfalls der Krümmungsrichtung, Sicht und Markierung könnten Gewichtungen eine Verbesserung der Aussage des Gefährdungsindex bedeuten.

Ein ungünstiger Einfluss erhält eine Gewichtung > 1 . Für eine Nutzenfunktion mit definierten Abstufungen sind die vorhandenen Erkenntnisse noch nicht genügend verifiziert. Zu einem späteren Zeitpunkt ist es vielleicht möglich, solche Funktionen für jeden Faktor zu erstellen.

Tabelle 7-18: mögliche weitere Faktoren für Gefährdungsindex I (Unfalltypen)

Faktor	Beschrieb	
Fahrbahnbreiten a	...bei sehr schmalen oder sehr breiten Fahrbahnen	a > 1
	...sonst	a = 1
Streckencharakteristik b	...bei einer Kurve nach einem längeren gestreckten Strassenabschnitt	b > 1
	...kurvige Strecke	b = 1
Radius r	...wenn der vorhandene Radius und die signalisierte Geschwindigkeit nicht den Normvorgaben entsprechen	r > 1
	...gemäss Normvorgaben	r = 1
Krümmungsrichtung c	...für Linkskurven	c > 1
	...für Rechtskurven	c = 1
Sicht d	...für Kurven mit begrenzter Sicht	d > 1
	...Sicht stark eingeschränkt oder offen	d = 1
Vorhandene Markierung e	...wenn eine Sicherheitslinie vorhanden ist	e > 1
	...keine Sicherheitslinie	e = 1

Quelle: eigene Darstellung

7.4. Resultate aus der Auswertung der Spurdaten

7.4.1. Einleitung

Die Spurdaten wurden mit einer linearen Regressionsanalyse und mit einer Rough Set Analyse ausgewertet (vgl. Kapitel 4.5). Insgesamt konnten zehn Kurven mit total 1585 Einzelspuren ausgewertet werden.

7.4.2. Regressionsanalyse der Spurdaten

Mit einer multiplen linearen Regression wurde untersucht, wie gross der Einfluss der einzelnen Kurvenelemente auf die Spurtypen ist. Durchgeführt wurde diese Analyse mit dem Statistikprogramm SPSS 21. Als abhängige Variable wurde der Spurtyp gewählt, als unabhängige Variablen (Einflussfaktoren) diejenigen in der untenstehenden Tabelle (Tab. 7-19), d.h., die gleichen wie in Kapitel 7.3.4. In der Regressionsanalyse werden die Signifikanz und die Regressionskoeffizienten ermittelt.

Tabelle 7-19: Konstanten für Kovarianzanalyse Unfalltyp

Sicht nach innen	Breite in Bogenmitte
Radius	Winkeländerung
Krümmungsrichtung	Streckencharakteristik
Höchstgeschwindigkeit	Streckentyp
Mittellinie gestrichelt	DTV
Übergangsbogen	Quergefälle in Kurvenmitte
Steigung in Längsrichtung	Sicherheitslinie durchgezogen
Randmarkierung	Breite der Zufahrtsgeraden

Quelle: eigene Darstellung

Die durchgeführte ANOVA zeigt, dass signifikante Unterschiede (Sig. =.000 < 0.05) zwischen den einzelnen Faktoren bestehen. Sie zeigt aber nicht, zwischen welchen Faktoren diese Unterschiede auftreten (Tab. 7-20).

Tabelle 7-20: ANOVA „Spurtyp“

ANOVA ^a					
Modell		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F
1	Regression	2930.280	11	266.389	102.664
	Nicht standardisierte Residuen	4081.553	1573	2.595	
	Gesamt	7011.833	1584		

a. Abhängige Variable: Spurtyp

b. Einflußvariablen : (Konstante), Streckentyp, Mittellinie gestrichelt, Randmarkierung, Radius, Höchstgeschwindigkeit, Winkeländerung, Übergangsbogen, Streckencharakteristik, Krümmungsrichtung, Kurvenlage, i (ca. +/- %) bzgl. Hinverkehr

Die grössten Einflüsse haben die Kurvenlage, die Höchstgeschwindigkeit und der Streckentyp (Tab. 7-21). Die Höchstgeschwindigkeit hat durch die minimalen Radien der Projektierungsgeschwindigkeit einen Zusammenhang mit den geometrischen Eigenschaften der Kurve, die beiden anderen Faktoren sind umgebungsbedingt.

Tabelle 7-21: lineare Regressionsanalyse „Spurtyp“, Modell 1, Schritt 1

Koeffizienten ^a						
Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T.	Sig
		Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Beta		
1	(Konstante)	.384	2.056		.187	.852
	Radius	.032	.067	.019	.473	.636
	Krümmungsrichtung	.039	.294	.009	.132	.895
	Winkeländerung	.117	.117	.053	1.000	.318
	Übergangsbogen	.348	.262	.040	1.327	.185
	i (ca. +/- %) bzgl. Hinverkehr	.055	.134	.032	.413	.680
	Randmarkierung	.615	1.679	.007	.367	.714
	Mittellinie gestrichelt	-.043	.183	-.010	-.232	.817
	Streckencharakteristik	-.192	.249	-.046	-.771	.441
	Kurvenlage	1.622	.156	.636	10.388	.000
	Höchstgeschwindigkeit	.599	.116	.197	5.162	.000
	Streckentyp	-.717	.186	-.170	-3.848	.000

a. Abhängige Variable: Spurtyp

Die Faktoren in der untenstehenden Tabelle (Tab. 7-22) wurden vom Modell ausgeschlossen.

Tabelle 7-22: lineare Regressionsanalyse „Spurtyp“, Modell 1, ausgeschlossene Variablen

Ausgeschlossene Variablen ^a						
Modell		Beta In	T	Sig.	Partielle Korrelation	Kollinearitätsstatistik
		Toleranz				
1	Breite der Zufahrtsgeraden	. ^b	.	.	.	.000
	Breite in Bogenmitte	. ^b	.	.	.	.000
	p Bogenmitte [%]	. ^b	.	.	.	-1.550E-013
	Sicht nach innen	.000 ^b	.000	1.000	.000	1.569E-013
	Sicherheitslinie durchgezogen	. ^b	.	.	.	.000
	DTV	. ^b	.	.	.	.000

a. Abhängige Variable: Spurtyp

b. Einflußvariablen im Modell: (Konstante), Streckentyp, Mittellinie gestrichelt, Randmarkierung, Radius, Höchstgeschwindigkeit, Winkeländerung, Übergangsbogen, Streckencharakteristik, Krümmungsrichtung, Kurvenlage, i (ca. +/- %) bzgl. Hinverkehr

Betrachtet man die ausgeschlossenen Faktoren des ersten Modells separat, so ergeben sich folgende Resultate (Tab. 7-23). Die Unterschiede zwischen den Faktoren sind signifikant.

Tabelle 7-23: ANOVA „Spurtyp“, Modell 2

ANOVA ^a					
Modell		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F
2	Regression	2028.635	6	338.106	107.066
	Nicht standardisierte Residuen	4983.198	1578	3.158	
	Gesamt	7011.833	1584		

a. Abhängige Variable: Spurtyp

b. Einflußvariablen : (Konstante), Randmarkierung, Streckencharakteristik, Sicherheitslinie durchgezogen , Sicht nach innen, Breite der Zufahrtsgeraden, Breite in Bogenmitte

Alle geometrischen Faktoren in der untenstehenden Tabelle sowie die Streckencharakteristik sind signifikant unterschiedlich (<0.05). Den grössten Einfluss haben die Fahrstreifenbreite in Bogenmitte und in der Zufahrtsgeraden sowie das Vorhandensein einer Sicherheitslinie (Tab. 7-24).

Tabelle 7-24: lineare Regressionsanalyse „Spurtyp“, Modell 2, Schritt 1

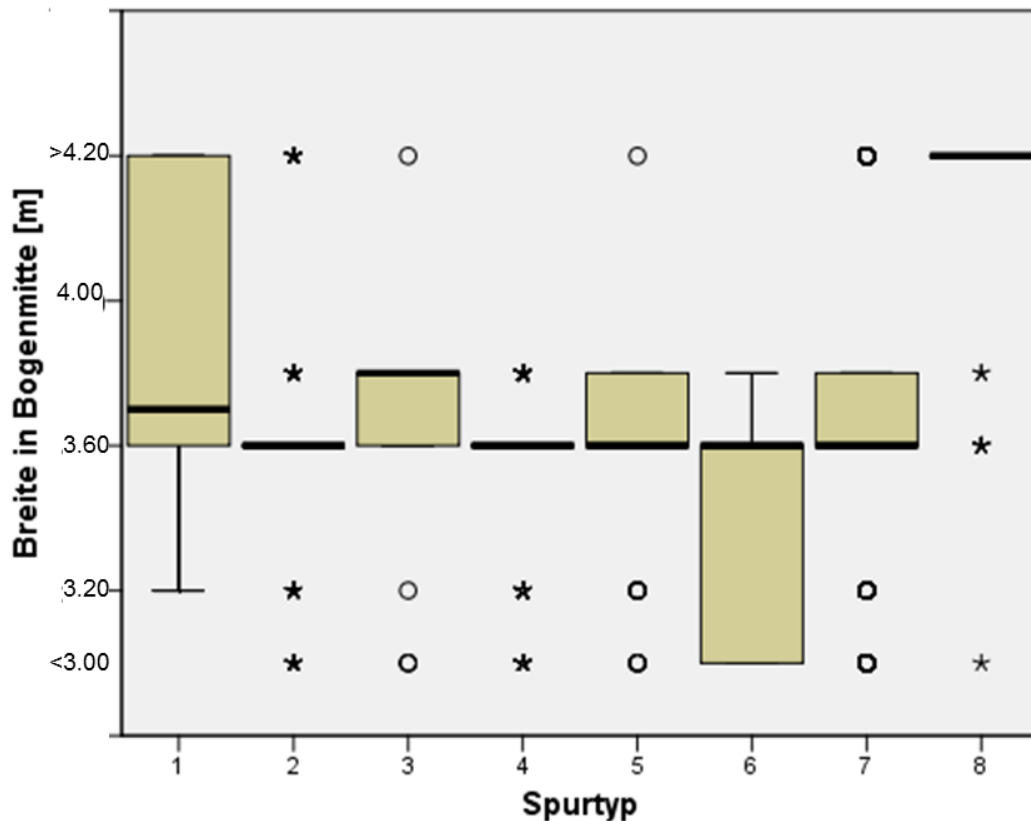
Koeffizienten ^a						
Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T.	Sig
		Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Beta		
2	(Konstante)	1.603	1.807		.887	.375
	Breite der Zufahrtsgeraden	-.314	.049	-.274	-6.414	.000
	Breite in Bogenmitte	.375	.043	.415	8.655	.000
	Sicht nach innen	.280	.080	.109	3.512	.000
	Sicherheitslinie durchgezogen	-1.027	.117	-.235	-8.749	.000
	Streckencharakteristik	.624	.154	.148	4.049	.000
	Randmarkierung	3.572	1.790	.043	1.996	.046

a. Abhängige Variable: Spurtyp

- **Fahrstreifenbreite**

Es gibt Hinweise darauf, dass die Breite des Fahrstreifens in Bogenmitte einen Einfluss auf den Spurtypen hat. Bei grossen Fahrstreifenbreiten treten viele Spuren des Typs „Ideal“, bei kleinen Breiten viele Spuren des Typs „Hinaustragen“ auf (Abb. 7-25). Die übrigen Spuren treten v.a. bei Fahrstreifenbreiten um 3.6m auf.

Abbildung 7-25: Spurtyp und Fahrstreifenbreite in Bogenmitte

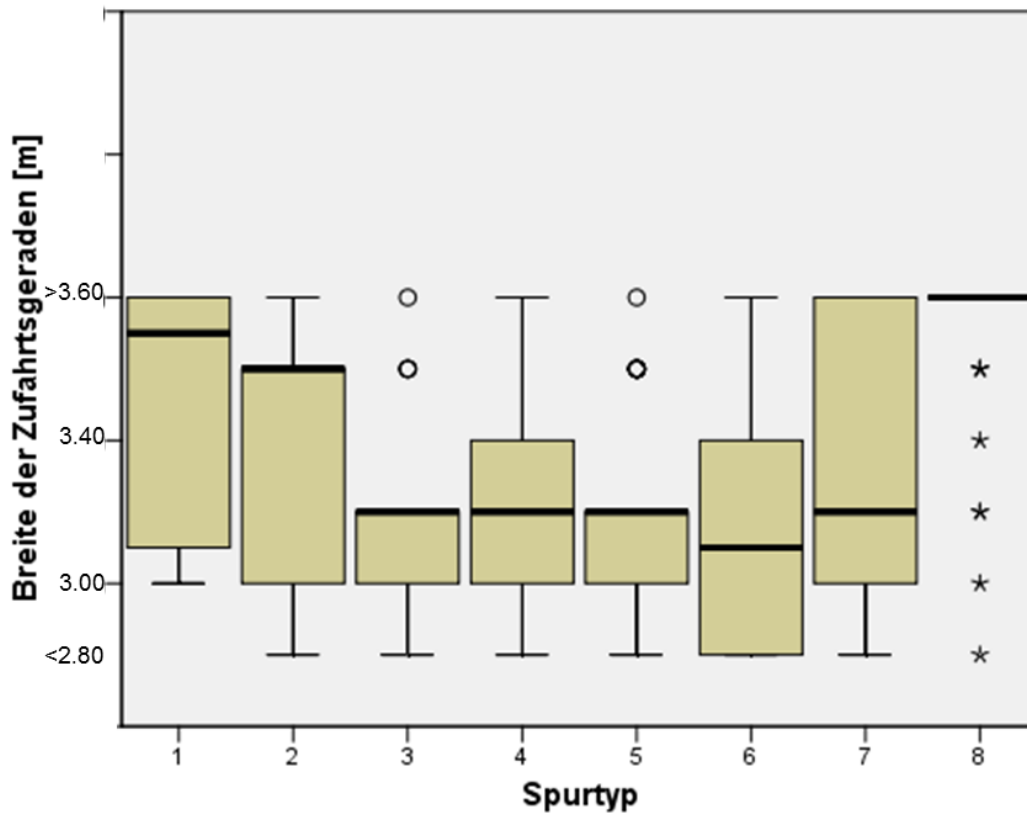


1	Ideal	5	Ausholen
2	Normal	6	Hinaustragen
3	Korrigieren	7	Übrige
4	Schneiden	8	Crash

Quelle: eigene Darstellung

Die Mittelwerte der Fahrstreifenbreiten der Zufahrtsgeraden variieren stärker als in Bogenmitte (Abb. 7-26). Die Spurtypen 1 und 2 (Ideal und Normal) treten bei Mittelwerten der Fahrstreifenbreiten bei rund 3.5m auf. Die Spurtypen 3, 4, 5 (Korrigieren, Schneiden und Ausholen) haben Mittelwerte der Fahrstreifenbreiten bei ca. 3.2m. Der Mittelwert bei Spurtyp 6 (Hinaustragen) liegt sogar noch etwas tiefer.

Abbildung 7-26: Spurtyp und Fahrstreifenbreite der Zufahrtsgeraden



1	Ideal	5	Ausholen
2	Normal	6	Hinaustragen
3	Korrigieren	7	Übrige
4	Schneiden	8	Crash

Quelle: eigene Darstellung

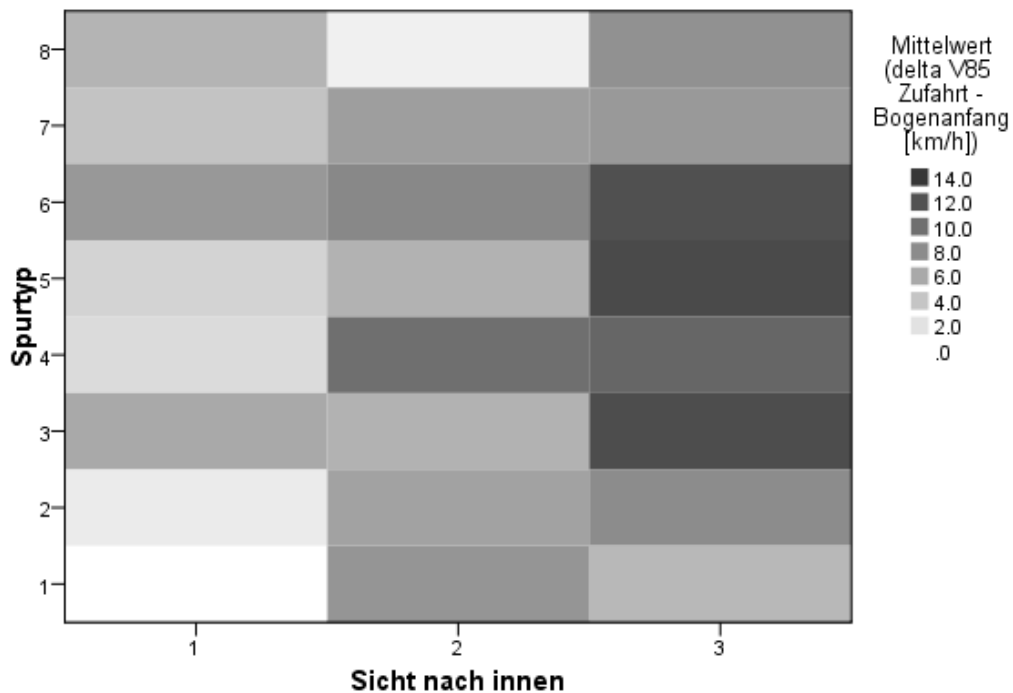
- **V₈₅**

Bei der Analyse der Unfalldaten konnte gezeigt werden, dass die Streckencharakteristik einen signifikanten Einfluss auf das Unfallgeschehen hat. Eine unerwartete Kurve nach einem längeren gestreckten Abschnitt kann zu Unfällen führen. Es ist anzunehmen, dass die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen der Gerade vor der Kurve und in der Kurve selber grösser sind als auf einer homogen trassierten Strecke. Zudem könnte eine ungenügende Sichtweite das Problem verschärfen. Im folgenden Abschnitt

soll untersucht werden, ob die vorhandenen Sichtweiten und die Geschwindigkeitsdifferenzen einen Zusammenhang mit den unerwünschten Spurtypen haben.

In den folgenden beiden Abbildungen sind die Mittelwerte der Geschwindigkeitsdifferenzen der V_{85} (schnell fahrende Fahrzeuge) zwischen Zufahrt/Bogenanfang und Bogenanfang/Bogenmitte je Spurtyp und Sichtweiten nach innen aufgetragen (Abb. 7-27 und 7-28). Je dunkler eine Fläche ist, desto grösser ist die Geschwindigkeitsdifferenz.

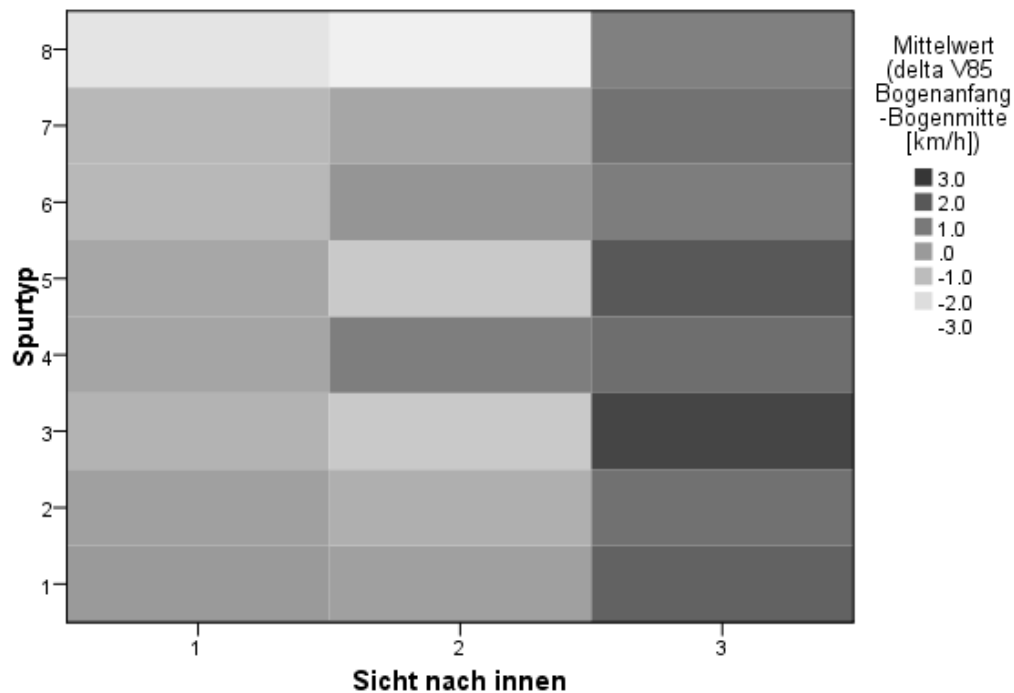
Die grössten Geschwindigkeitsdifferenzen bzw. Verzögerungen zwischen Zufahrtsgeraden und Bogenanfang treten bei offener Sicht, d.h. bei Kurven, in denen die Sicht bereits beim Übergangsbogenanfang bis ans Ende des Kreisbogens reicht, auf. Die grössten Differenzen zwischen Zufahrt und Bogenanfang weisen die Spurtypen 3, 5 und 6 auf („Korrigieren“, „Ausholen“ und „Hinaustragen“) (Abb. 7-27).

Abbildung 7-27: ΔV_{85} Zufahrt/Bogenanfang, Spurtyp und Sicht nach innen

1	Ideal	Sicht nach innen:	
2	Normal	1	stark eingeschränkt
3	Korrigieren	2	begrenzt
4	Schneiden	3	offen
5	Ausholen		
6	Hinaustragen		
7	Übrige		
8	Crash		

Quelle: eigene Darstellung

Die Differenzen ΔV_{85} zwischen Bogenanfang und Bogenmitte (Abb. 7-28) sind bei offener Sicht bei den Spurtypen 1, 3 und 5 („Ideal“, „Korrigieren“ und „Ausholen“) am grössten. Bei einer begrenzten Sichtweite wird bei den Spurtypen 3 und 5 („Korrigieren“ und „Ausholen“) bereits zu Beginn des Kurvenbogens wieder beschleunigt.

Abbildung 7-28: ΔV_{85} Bogenanfang/Bogenmitte, Spurtyp und Sicht nach innen

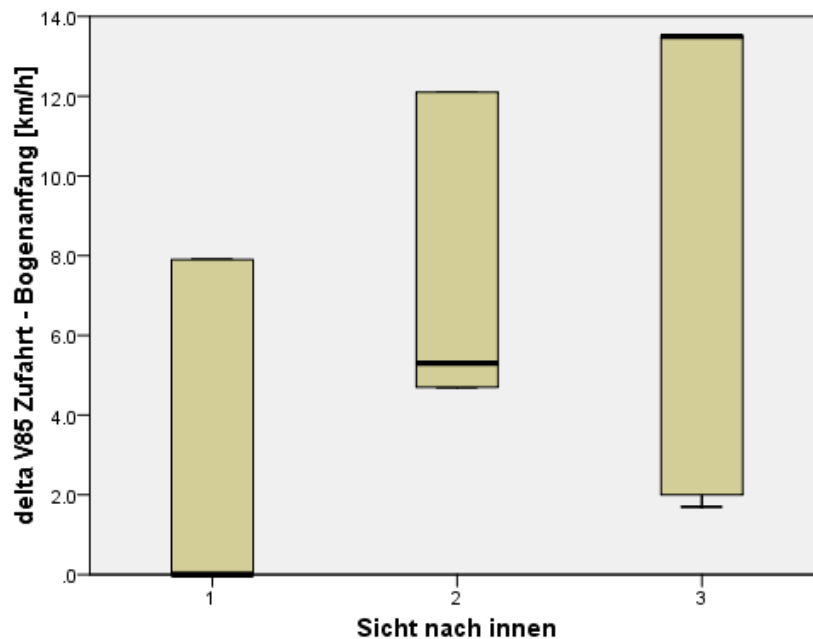
1	Ideal	Sicht nach innen:	
2	Normal	1	stark eingeschränkt
3	Korrigieren	2	begrenzt
4	Schneiden	3	offen
5	Ausholen		
6	Hinaustragen		
7	Übrige		
8	Crash		

Quelle: eigene Darstellung

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen der Zufahrtsgeraden und dem Bogenanfang aller Spurtypen zusammen, aufgetragen als Boxplots (Abb. 7-29). In Kurven mit stark eingeschränkter Sichtweite wird im Schnitt weniger stark abgebremst und es wird im Bereich des Kurvenbogens schon wieder beschleunigt (Abb. 7-30). Bei offener Sicht ist die Spannweite der Geschwindigkeitsreduktion zwischen Zufahrt und Bogenanfang grösser, im Kreisbogen der Kurve selber ist sie aber sehr klein.

Eine offene Sicht hilft dem Lenker bereits vor dem Kurvenbogen eine angepasste Geschwindigkeit zu wählen. Die Geschwindigkeitsanpassung der schnell fahrenden Fahrzeuge (V_{85}) ist im Mittel mit ca. 13.5 km/h wesentlich grösser als bei begrenzter Sicht (ca. 5 km/h) bzw. als bei stark eingeschränkter Sicht (ca. 0 km/h). Die Abbildungen machen allerdings keine Aussage über das absolute Geschwindigkeitsniveau.

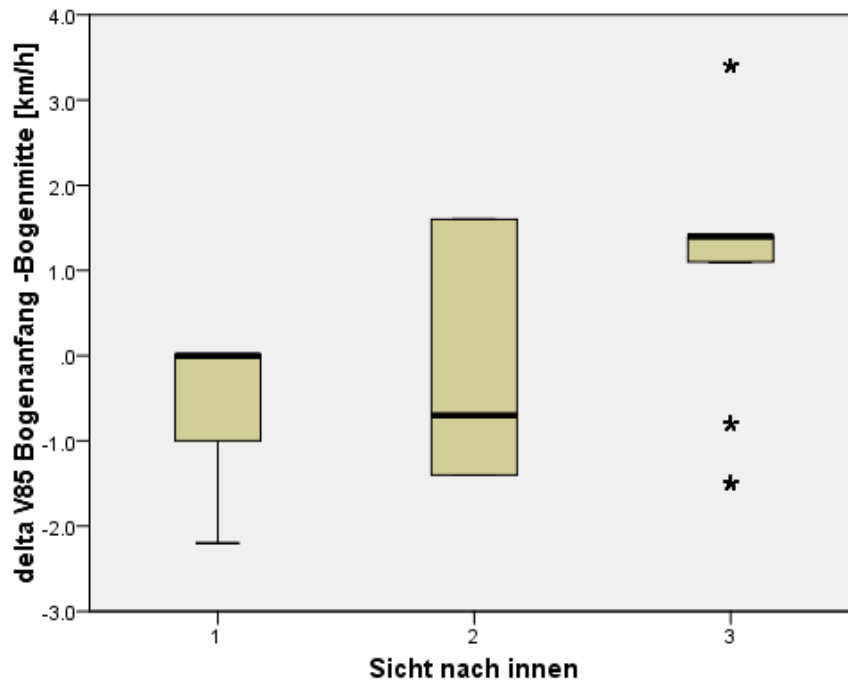
Abbildung 7-29: ΔV_{85} Zufahrt/Bogenanfang und Sicht nach innen



Sicht nach innen:

- 1 stark eingeschränkt
- 2 begrenzt
- 3 offen

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 7-30: ΔV_{85} Bogenanfang/Bogenmitte und Sicht nach innen

Sicht nach innen:

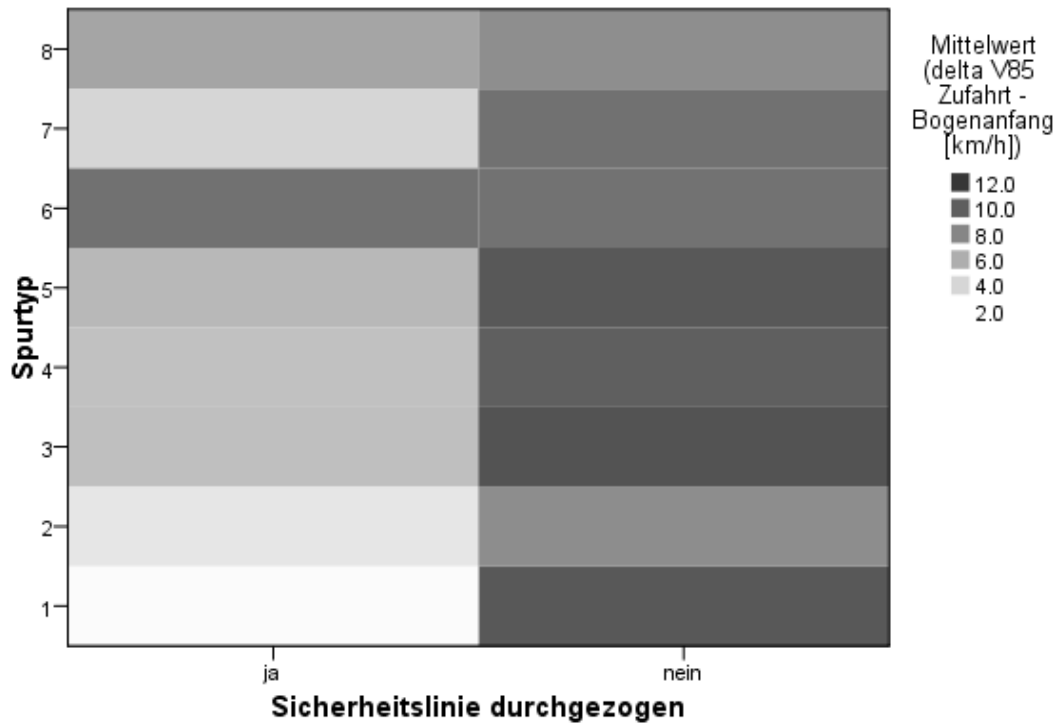
- 1 stark eingeschränkt
- 2 begrenzt
- 3 offen

Quelle: eigene Darstellung

• Sicherheitslinie

In den folgenden beiden Abbildungen (Abb. 7-31 und 7-32) sind die Mittelwerte der Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Zufahrt/Bogenanfang und Bogenanfang/Bogenmitte je Spurtyp und vorhandener Sicherheitslinie ja/nein aufgetragen. Je dunkler eine Fläche ist, desto grösser ist die Geschwindigkeitsdifferenz. Die Differenzen sind allgemein grösser, wenn keine durchgezogene Sicherheitslinie vorhanden ist. Die grössten Differenzen weisen die Spurtypen 1, 3, 4 und 5 auf („Ideal“, „Korrigieren“, „Schneiden“ und „Ausholen“). Eine durchgezogene Sicherheitslinie hilft dem Lenker offenbar dabei, eine angepasste Geschwindigkeit vor der Kurve zu wählen.

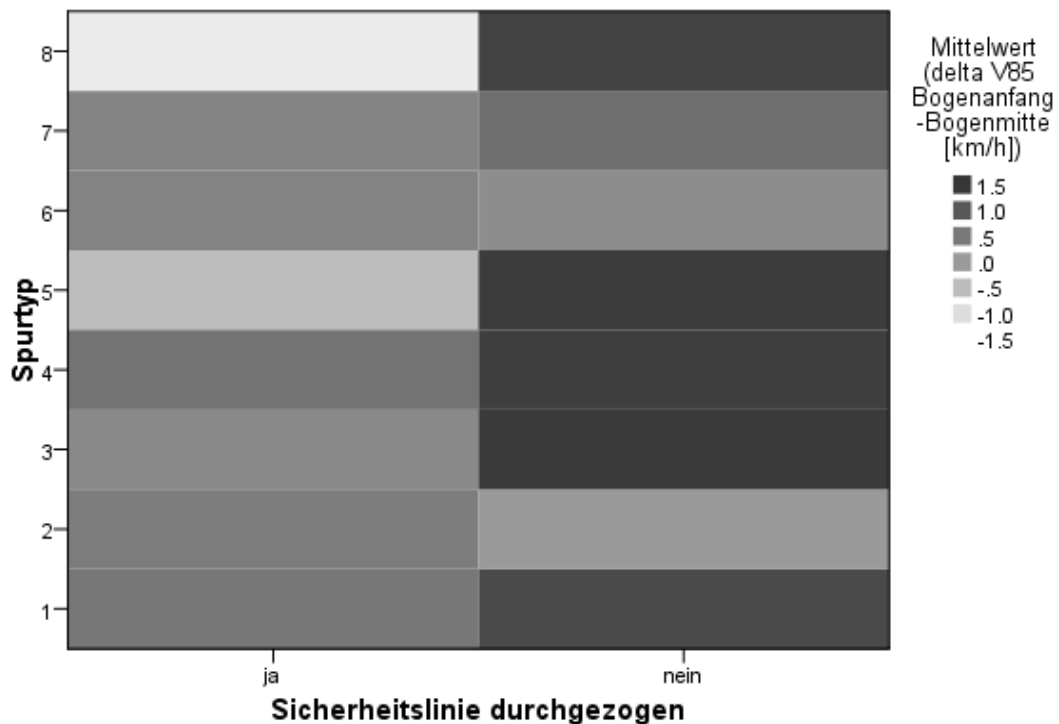
Abbildung 7-31: Sicherheitslinie und Spurtyp und ΔV_{85} Zufahrt/Bogenanfang



1	Ideal	5	Ausholen
2	Normal	6	Hinaustragen
3	Korrigieren	7	Übrige
4	Schneiden	8	Crash

Quelle: eigene Darstellung

Die Differenzen der Geschwindigkeiten sind zwischen Zufahrt und Bogenanfang generell grösser als zwischen Bogenanfang und Bogenmitte, unabhängig davon, ob eine Sicherheitslinie vorhanden ist oder nicht.

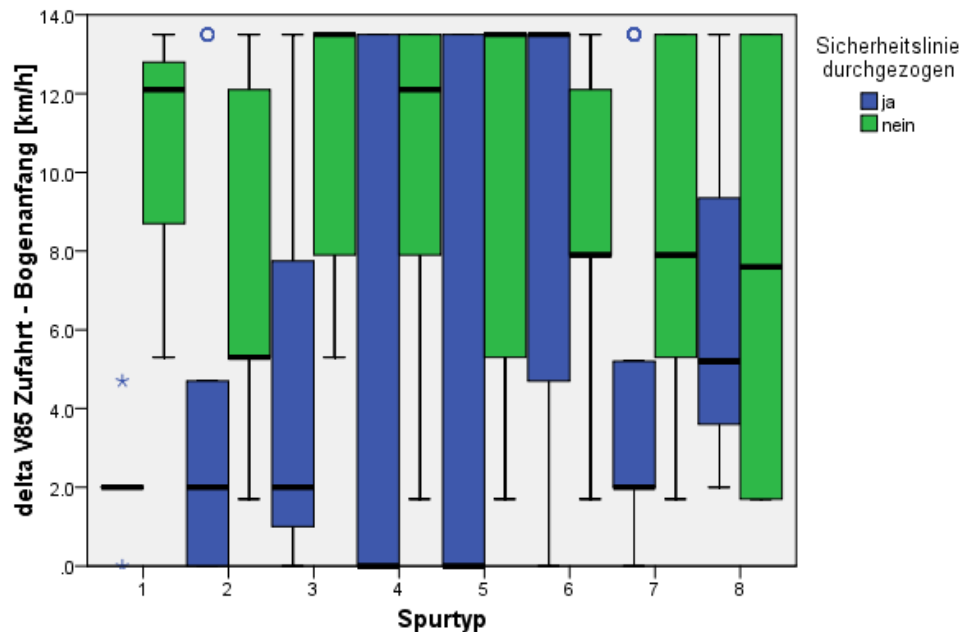
Abbildung 7-32: Sicherheitslinie und Spurtyp und ΔV_{85} Bogenanfang/Bogenmitte

1	Ideal	5	Ausholen
2	Normal	6	Hinaustragen
3	Korrigieren	7	Übrige
4	Schneiden	8	Crash

Quelle: eigene Darstellung

Die zwei untenstehenden Abbildungen (Abb. 7-33 und 7-34) zeigen die Absolutwerte der Geschwindigkeitsdifferenzen je Spurtyp. In der Zufahrt besteht bei vorhandener Sicherheitslinie eine deutlich kleinere Differenz ΔV_{85} bei den Spurtypen 1, 2 und 3 („Ideal“, „Normal“ und „Korrigieren“) als bei den Typen 4, 5 und 6 („Schneiden“, „Ausholen“ und „Hinaustragen“). Ohne Sicherheitslinie liegen alle Spurtypen im Mittel über einem ΔV_{85} -Wert von 5.5 km/h. Mit Sicherheitslinie liegen die Mittelwerte der ΔV_{85} zwischen 0 und 5 km/h.

Abbildung 7-33: Geschwindigkeitsdifferenzen und Spurtyp, Zufahrt/Bogenanfang

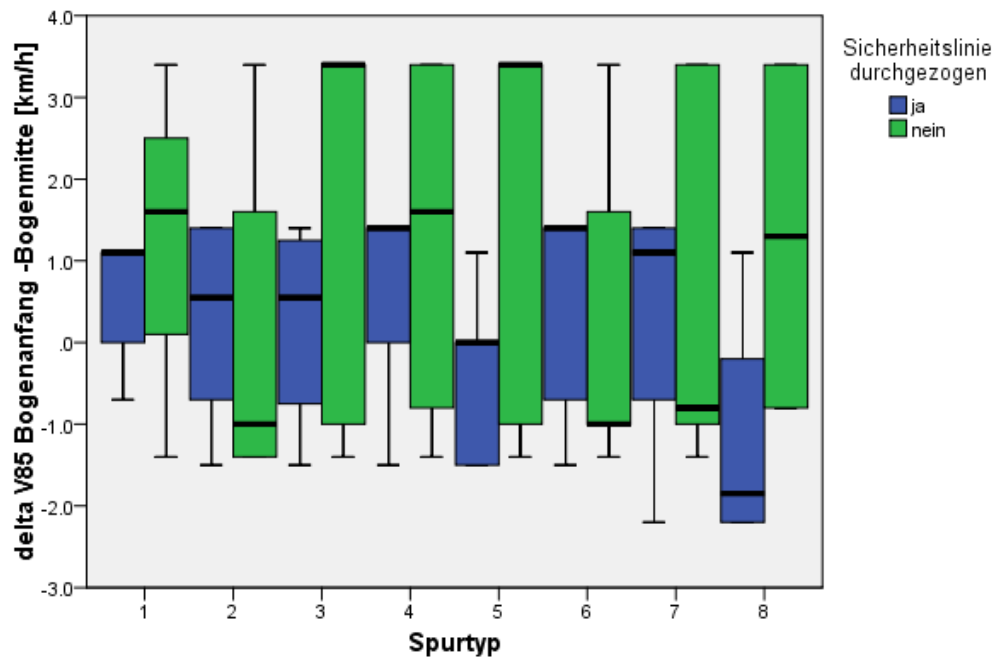


1	Ideal	5	Ausholen
2	Normal	6	Hinaustragen
3	Korrigieren	7	Übrige
4	Schneiden	8	Crash

Quelle: eigene Darstellung

Im Bereich zwischen Bogenanfang und –mitte (Abb. 7-34) führt die durchgezogene Sicherheitslinie zu einer kleineren Geschwindigkeitsdifferenz, ausser bei den Spurtypen 2 und 6. Die unerwünschten Spurtypen „Korrigieren“ und „Ausholen“ haben im Mittel sowohl in Kurven mit als auch ohne Sicherheitslinie grössere Geschwindigkeitsdifferenzen als der Spurtyp „Schneiden“.

Abbildung 7-34: Geschwindigkeitsdifferenzen und Spurtyp, Bogenanfang/Bogenmitte



1	Ideal	5	Ausholen
2	Normal	6	Hinaustragen
3	Korrigieren	7	Übrige
4	Schneiden	8	Crash

Quelle: eigene Darstellung

Generell hat eine Sicherheitslinie ein homogeneres Geschwindigkeitsniveau mit kleineren Differenzen zur Folge. Eine Sicherheitslinie bietet dem Fahrer eine optische Orientierungshilfe, der Kurvenverlauf ist ev. besser einzuschätzen und die Geschwindigkeit kann bereits vor der Kurve reduziert werden.

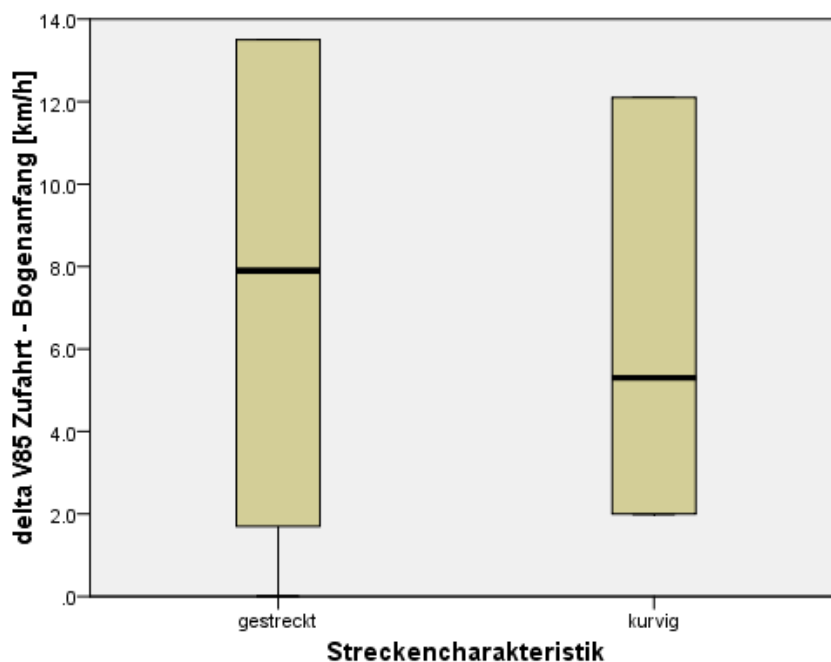
Eine durchgezogene Sicherheitslinie begünstigt die Häufigkeiten der Spurtypen „Normal“, „Hinaustragen“ und „Übrige“. Wenn keine durchgezogene Sicherheitslinie vorhanden ist, treten im Verhältnis mehr Spurtypen „Ideal“, „Korrigieren“, „Ausholen“ und „Schneiden“ auf. Die Auswertungen dazu sind im Anhang D zu finden.

- **Streckencharakteristik**

Eine gestreckte Streckencharakteristik begünstigt die Häufigkeiten der Spurtypen „Ideal“, „Korrigieren“, „Ausholen“ und „Übrige“. Wenn die Strecke kurvig ist, treten im Verhältnis mehr Spurtypen „Normal“, „Schneiden“ und „Hinaustragen“ auf (siehe Abbildungen im Anhang D).

Das Mittel der Geschwindigkeitsdifferenz der V_{85} aller Spurtypen (Abb. 7-35) ist bei einer gestreckten Strecke zwischen Zufahrt und Bogenanfang grösser als bei einer kurvigen Strecke, die Erwartungshaltung der Lenker deckt sich bei gestreckter Linienführung nicht mit dem Erscheinungsbild der Strasse.

Abbildung 7-35: Geschwindigkeitsdifferenz V_{85} und Streckencharakteristik

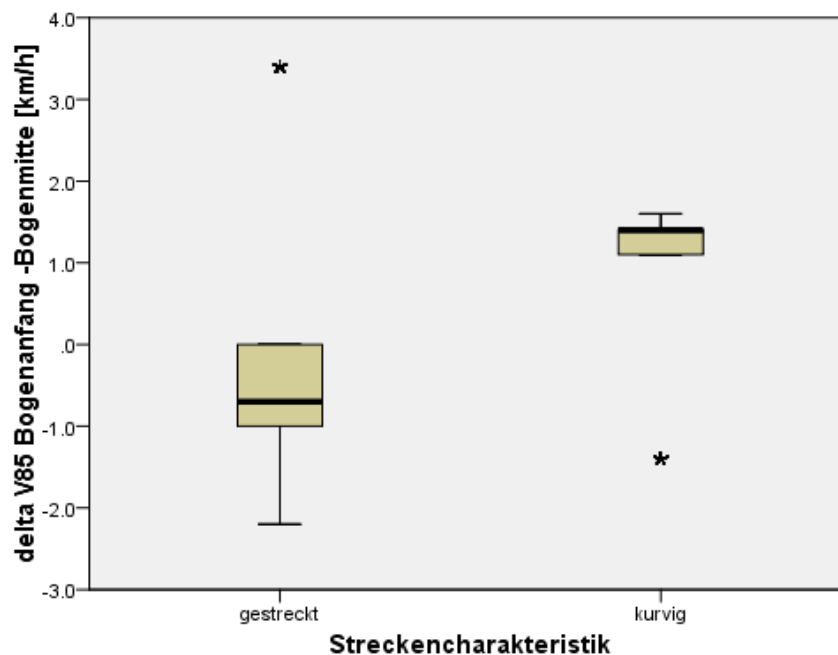


Quelle: eigene Darstellung

Das Mittel der Geschwindigkeitsdifferenz der V_{85} zwischen Bogenanfang und Bogenmitte (Abb. 7-36) ist bei einer gestreckten Strecke kleiner als bei einer kurvigen Strecke, weil die Geschwindigkeitsanpassung bereits

zwischen Zufahrt und Bogenanfang erfolgte. Bei einer gestreckten Strecke wird bereits wieder beschleunigt, während bei einer kurvigen Strecke weiter abgebremst werden muss.

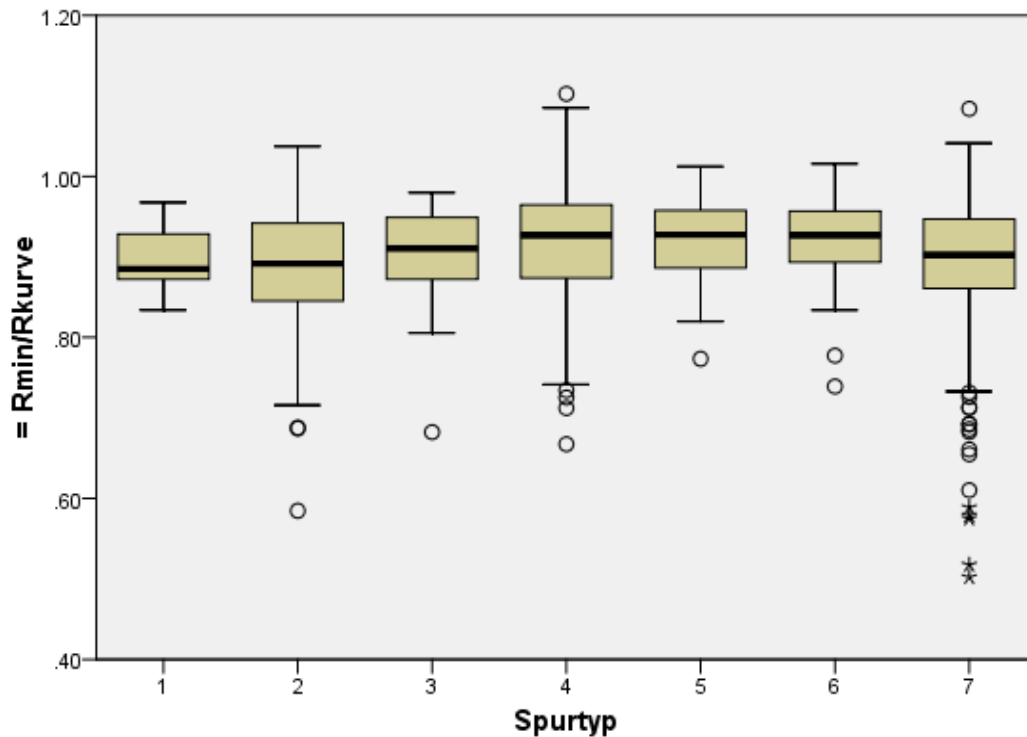
Abbildung 7-36: Geschwindigkeitsdifferenz V_{85} und Streckencharakteristik



Quelle: eigene Darstellung

- **Gefahrenere Radien**

Der Mittelwert des Verhältnisses von kleinstem gefahrenem Radius zu Kurvenradius liegt im Mittel bei ca. 0.9 (Abb. 7-37). Den grössten Mittelwert und die grösste Streuung hat der Spurtyp 4 („Schneiden“), den kleinsten der Spurtyp 1 („Ideal“) und 2 („Normal“).

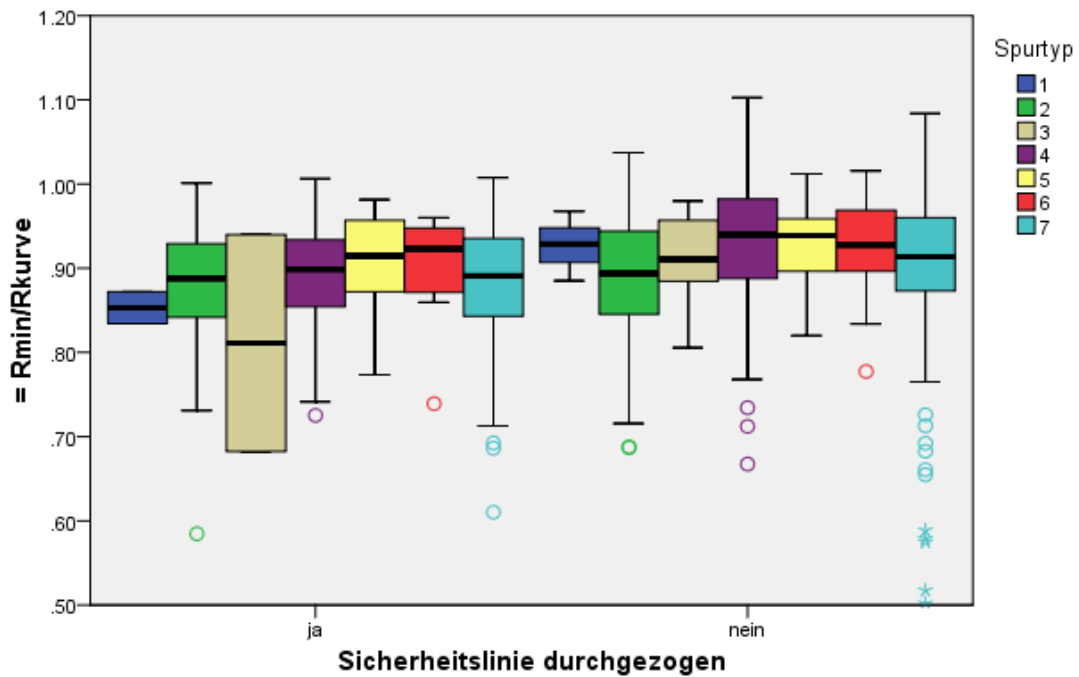
Abbildung 7-37: Spurtyp und Rmin/Rkurve

1	Ideal	5	Ausholen
2	Normal	6	Hinaustragen
3	Korrigieren	7	Übrige
4	Schneiden	8	Crash

Quelle: eigene Darstellung

Der Mittelwert des Verhältnisses von minimal gefahrenem Radius zu Kurvenradius ist bei einer durchgezogenen Sicherheitslinie leicht tiefer als ohne Sicherheitslinie (Abb. 7-38). Der grösste Unterschied besteht beim Spurtyp 3 („Korrigieren“). Auch die mit Abstand grösste Streuung. Bei diesem unerwünschten Spurtyp resultiert dort ist der gefahrene Radius im Mittel ca. 20% kleiner als der tatsächlich vorhandene. Der grösste gefahrene Radius findet sich beim Spurtypen 4 („Schneiden“). Bei diesem Spurtypen können sogar grössere Radien als der eigentliche Kurvenradius gefahren werden.

Abbildung 7-38: Sicherheitslinie und Rmin/Rkurve

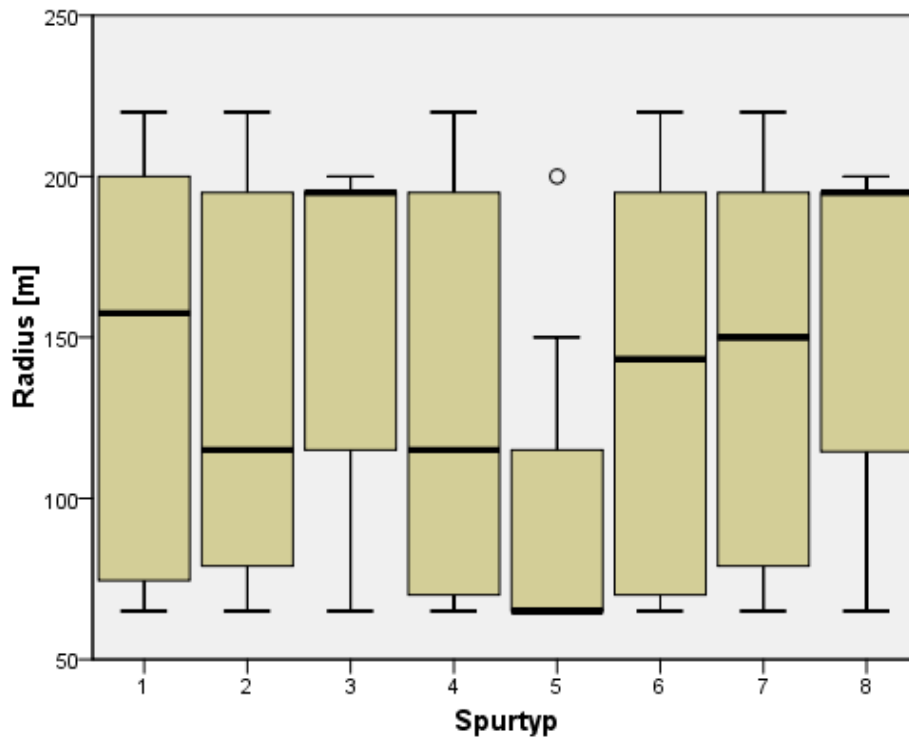


1	Ideal	5	Ausholen
2	Normal	6	Hinaustragen
3	Korrigieren	7	Übrige
4	Schneiden	8	Crash

Quelle: eigene Darstellung

Der Mittelwert der Kurvenradien, in denen ein Spurtyp auftritt, liegt beim Spurtyp 5 („Ausholen“) am tiefsten, beim Spurtyp 3 („Korrigieren“) am höchsten. Ebenfalls bei eher kleineren Radien treten die Spurtypen 2 und 4 („Normal“ und „Schneiden“) auf (Abb. 7-39).

Abbildung 7-39: Radius und Spurtyp



1	Ideal	5	Ausholen
2	Normal	6	Hinaustragen
3	Korrigieren	7	Übrige
4	Schneiden	8	Crash

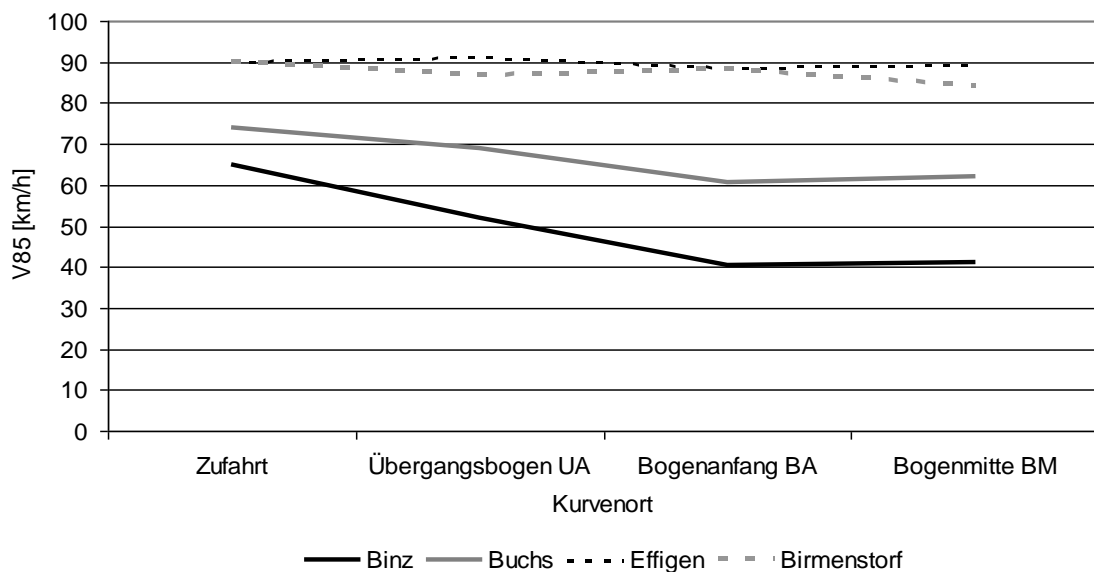
Quelle: eigene Darstellung

• Geschwindigkeitsverlauf

Wie die vier Beispielkurven in Abbildung 7-40 zeigen, tritt bei einer grossen Verzögerung diese bereits vor der Kurve auf (Binz, Radius = 30m und Buchs, Radius = 65m), die Fahrzeuglenker bremsen schon in der Zufahrtsgeraden. Dies deutet darauf hin, dass eine Kurve entweder frühzeitig erkennbar ist oder dass ein kleinerer Radius eine grössere Geschwindigkeitsanpassung erfordert. Vor allem bei Kurven mit kleineren Radien tritt dieser Effekt verstärkt auf. Im Bereich zwischen Bogenanfang und Bogenmitte wird nicht mehr weiter abgebremst. Bei Kurven mit grösserem Radius (Effigen, Radius = 150m und Birmenstorf, Radius = 233m) bremsen die

Lenker hingegen kaum ab, die Kurve muss also entweder bereits frühzeitig erkennbar sein, oder sie erlaubt das Befahren mit der gleichen Geschwindigkeit wie im Abschnitt vorher. Die Kurve in Effigen ist mit einem Radius von 150m eigentlich nur für eine Projektierungsgeschwindigkeit von ca. 65 km/h trassiert. Dennoch liegt die V_{85} bei rund 90 km/h. Es ist anzunehmen, dass die Kurve sehr übersichtlich ist.

Abbildung 7-40: V_{85} in Abhängigkeit des Kurvenortes



Quelle: eigene Darstellung

- **Geschwindigkeitsdifferenzen**

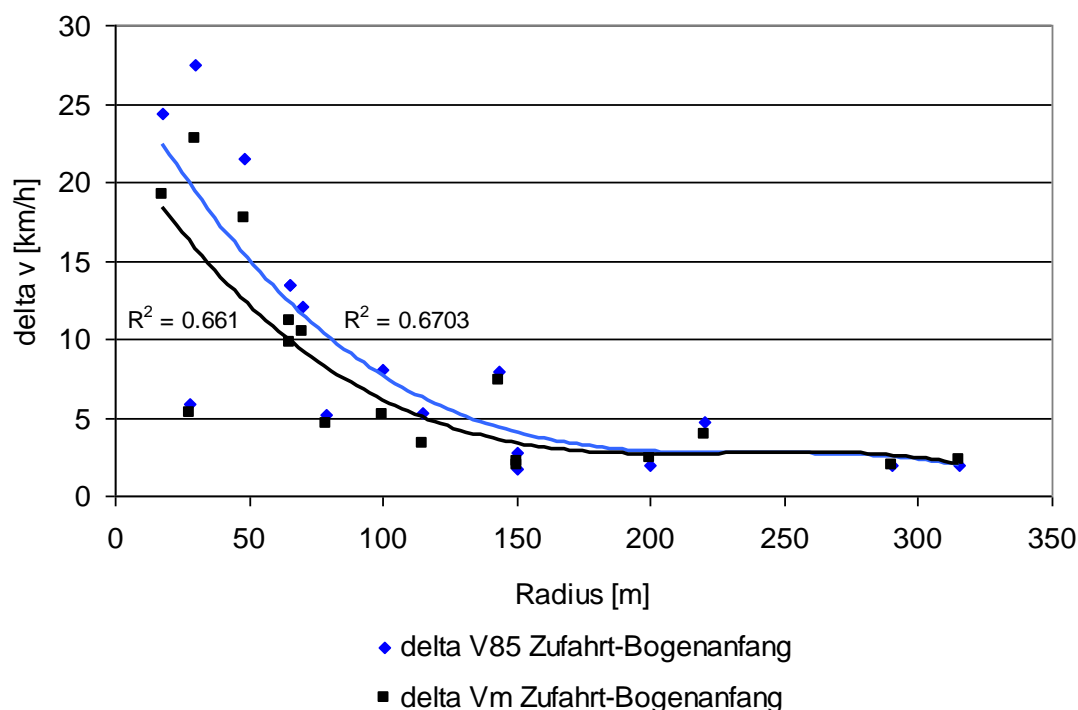
Die Abbildung 7-41 zeigt die absolute Geschwindigkeitsdifferenz ΔV zwischen der Zufahrtsgeraden und dem Kreisbogenanfang für mittlere (V_m) und V_{85} -Geschwindigkeiten. Es zeigt sich, dass die Abnahme der Geschwindigkeiten im Zusammenhang mit dem Kurvenradius steht. Bis zu einem Radius von ca. 75m nimmt sowohl die mittlere als auch die 85%-Geschwindigkeit stark ab, die Lenker bremsen auf die Kurve hin.

Allerdings gibt es auch in diesem Radienbereich Kurven, die ein Abbremsen von nur ca. 5 km/h erfordern, die Trassierung dieser Strecken erscheint homogener. Die kleinste Geschwindigkeitsabnahme zeigt sich bei Radien zwischen 200m und 300m. Eine kleine Geschwindigkeitsdifferenz deutet

darauf hin, dass die Kurven frühzeitig sichtbar sind bzw. dass die Radiengrösse nur eine kleinere Geschwindigkeitsanpassung gegenüber der Zufahrt bedarf.

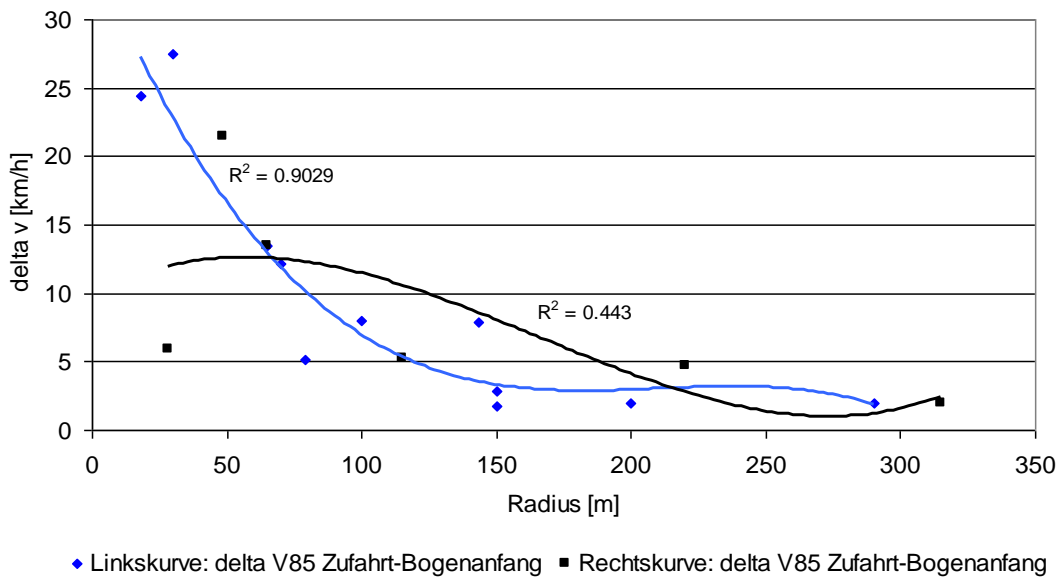
Bei einem Radius von 120m beträgt die Projektierungsgeschwindigkeit 60 km/h, bei 240m beträgt sie 80 km/h. Es sind v.a. Kurven, die mit 60 km/h signalisiert sind, welche eine grössere Geschwindigkeitsdifferenz aufweisen resp. ein verstärktes Abbremsen erfordern.

Abbildung 7-41: ΔV Zufahrt-Bogenanfang in Funktion des Radius



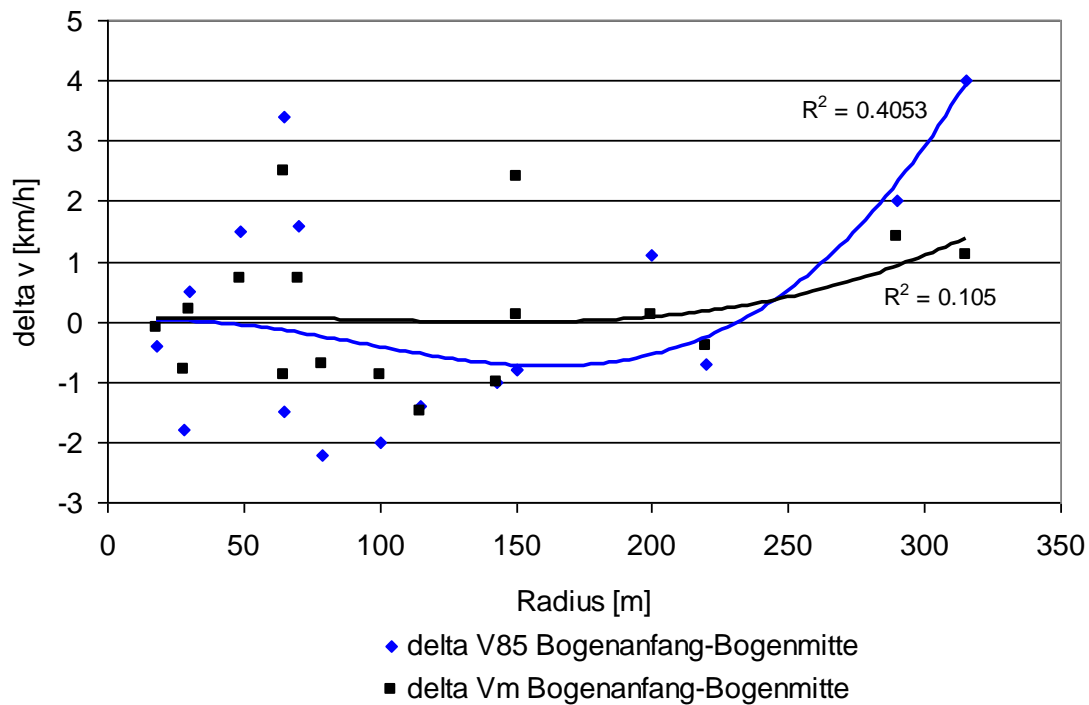
Quelle: eigene Darstellung

Betrachtet man die Geschwindigkeitsdifferenzen in Links- und Rechtskurven für V_{85} (Abb. 7-42), so zeigt sich, dass in Linkskurven mit kleinen Radien leicht stärker abgebremst werden muss als bei Rechtskurven. Der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsdifferenz und Radius ist bei Rechtskurven jedoch nicht gleich deutlich, das Bestimmtheitsmass ist mit 0.443 nur halb so gross wie bei den Linkskurven mit 0.9029.

Abbildung 7-42: ΔV Zufahrt-Bogenanfang in Funktion der Krümmungsrichtung

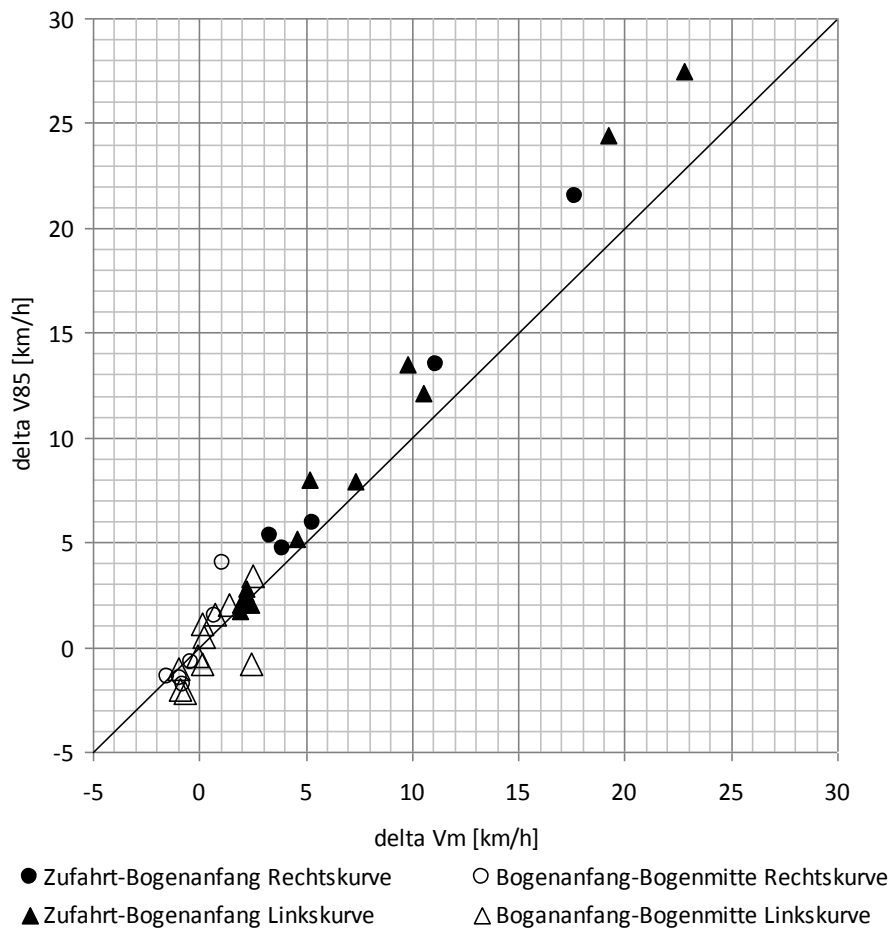
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 7-43 zeigt die absoluten Geschwindigkeitsdifferenzen für V_m und V_{85} zwischen Bogenanfang und Bogenende. Hier zeigt sich kein klarer Trend. Es gibt vor allem Kurven mit Radien $\leq 150\text{m}$, in denen noch weiter abgebremst wird und solche, in denen nach Bogenanfang bereits wieder beschleunigt werden kann. Allerdings liegen die ΔV im Bereich von nur einigen km/h. Dies deutet darauf hin, dass nicht alle Kurven von den Fahrzeuglenkern gleich früh erfasst werden, resp., dass nicht immer zum gleichen Zeitpunkt abgeschätzt werden kann, wie stark die erforderliche Verzögerung sein muss.

Abbildung 7-43: ΔV Bogenanfang-Bogenmitte in Funktion des Radius

Quelle: eigene Darstellung

Die Abbildung 7-44 zeigt den Zusammenhang zwischen der absoluten Geschwindigkeitsabnahme der „schnellen“ (V_{85}) und der „mittleren“ (V_m) Fahrzeuge. Die schnelleren Fahrzeuge (V_{85}) bremsen vor dem Bogenanfang in beiden Kurvenrichtungen stärker ab als solche mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit (V_m). Zwischen Bogenanfang und Bogenmitte tritt dieser Effekt in Linkskurven stärker auf als in Rechtskurven.

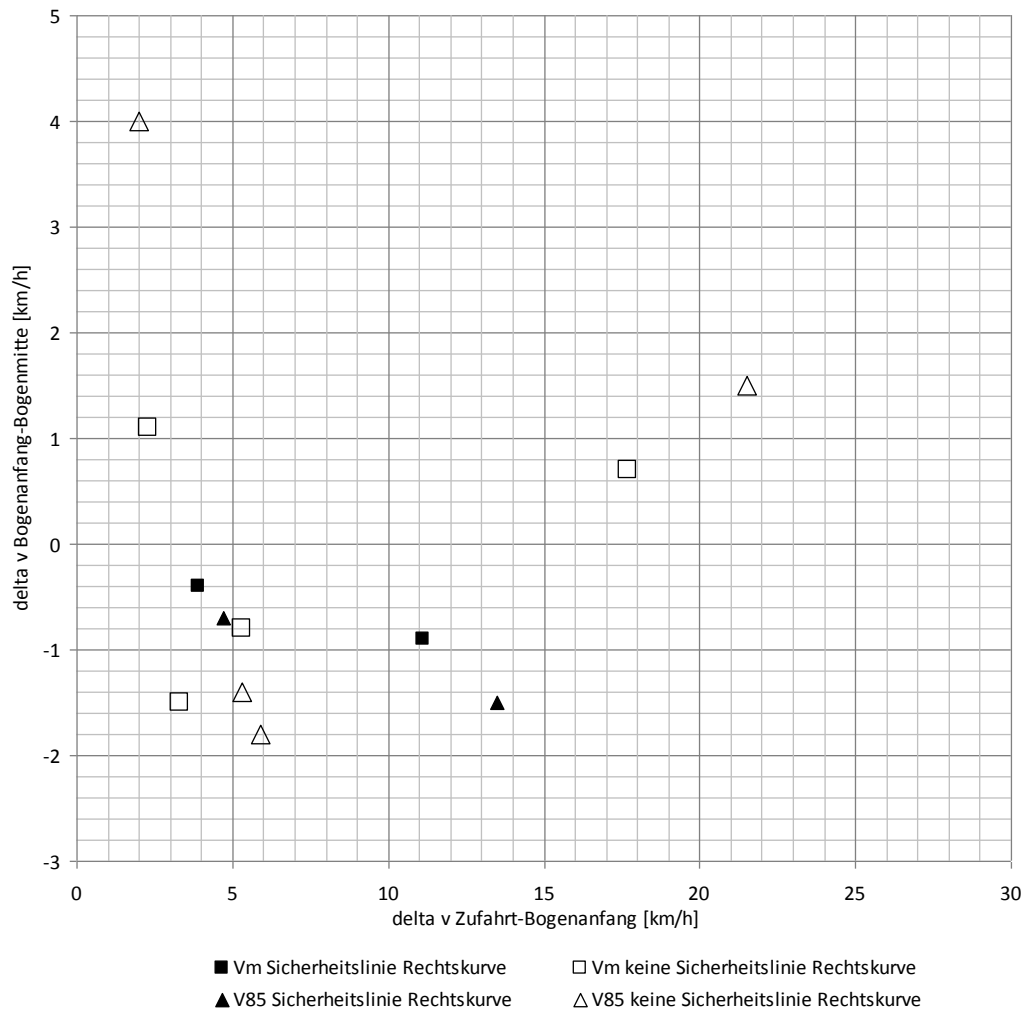
Abbildung 7-44: Zusammenhang ΔV_m und ΔV_{85} 

Quelle: eigene Darstellung

• ΔV und Sicherheitslinie

Abbildung 7-45 zeigt die Geschwindigkeitsdifferenzen in Rechtskurven mit und ohne Sicherheitslinien, Abbildung 7-46 denselben Zusammenhang für Linkskurven. Auf der x-Achse sind die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Zufahrt und Bogenanfang aufgetragen, auf der y-Achse diejenigen zwischen Bogenanfang und Bogenmitte.

Wenn eine Sicherheitslinie in Rechtskurven vorhanden ist, so beschleunigen die Fahrzeuglenker nach dem Bogenanfang wieder. Ohne Sicherheitslinie wird nach dem Bogenanfang sowohl weiter abgebremst als auch beschleunigt. Auch hier ist anzunehmen, dass die Erkennbarkeit der Kurven unterschiedlich ist. Für eine eindeutige Aussage zu bestimmten Trends sind u. U. zu wenige Daten vorhanden.

Abbildung 7-45: Rechtskurven mit/ohne Sicherheitslinie

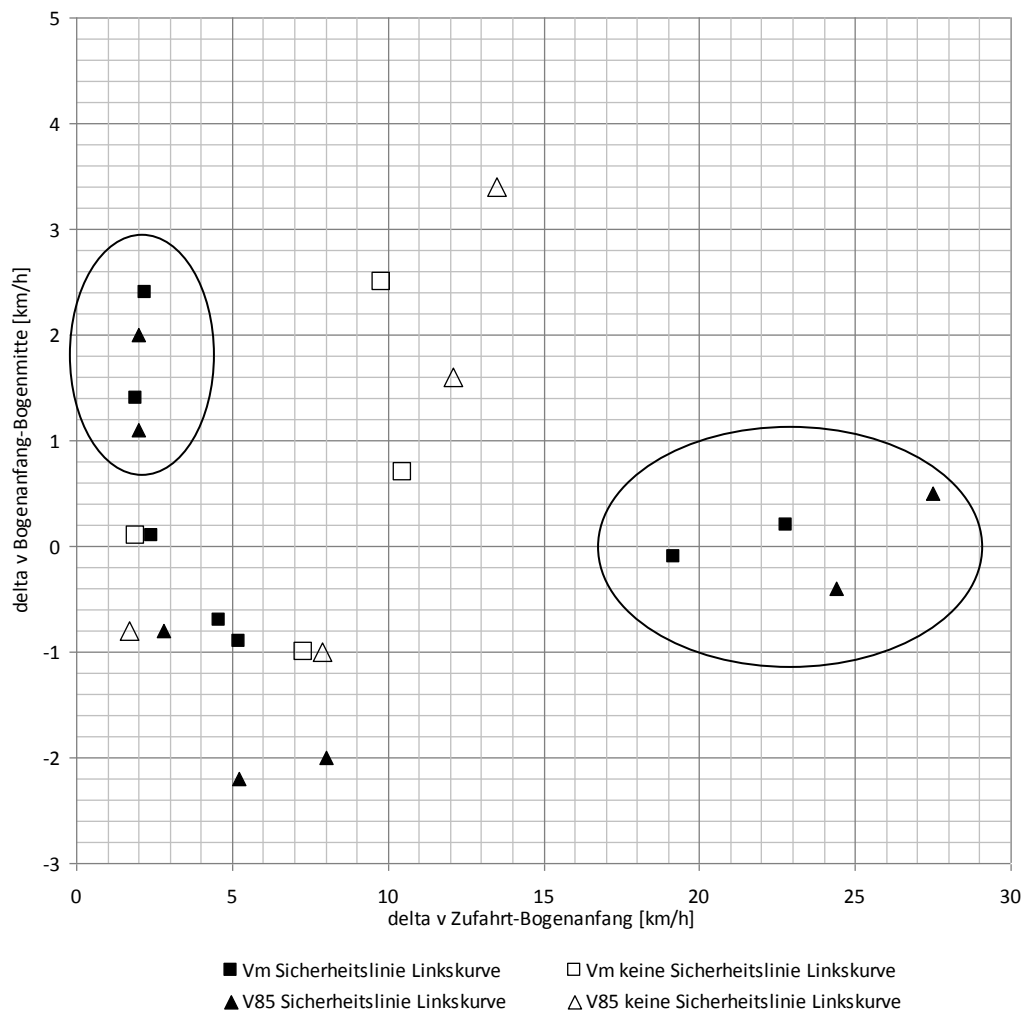
Quelle: eigene Darstellung

Bei Linkskurven mit Sicherheitslinie zeigt sich einerseits ein Bereich mit grosser Geschwindigkeitsabnahme zwischen Zufahrt und Bogenanfang und kleiner Geschwindigkeitsabnahme zwischen Bogenanfang und –mitte (Kreis rechts), und andererseits gibt es eine Gruppe, wo die Abnahme zwischen Zufahrt und Bogenanfang klein ist, diejenige zwischen Bogenanfang und –mitte (Kreis links) aber grösser als bei der ersten Gruppe (Abb. 7-46). Ohne Sicherheitslinien sind die Abnahmen zwischen Zufahrt und Bogenanfang generell kleiner.

Bei Linkskurven ohne Sicherheitslinie finden gut 2/3 der Verzögerung vor Bogenanfang statt, 1/3 im Bereich des Kreisbogens.

Sowohl bei Kurven mit als auch bei solchen ohne Sicherheitslinie gibt es Kurven, bei denen die Verzögerung zwischen Zufahrt und Bogenanfang klein und die Beschleunigung zwischen Bogenanfang und Bogenmitte ebenfalls klein ist. Dies deutet auf gut erkennbare Kurven (mit grösserem Radius) mit einem homogenen Geschwindigkeitsniveau hin.

Abbildung 7-46: Linkskurven mit/ohne Sicherheitslinie



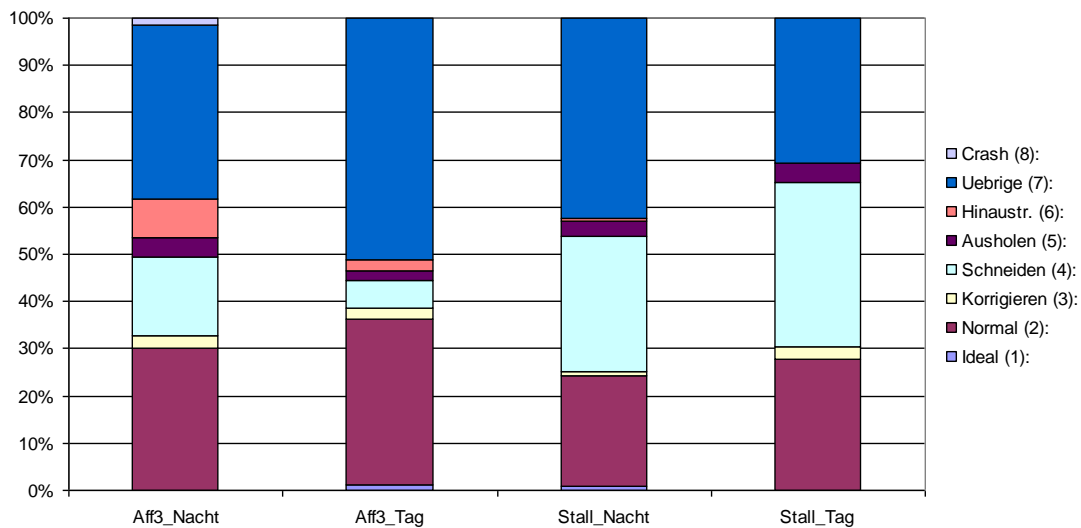
Quelle: eigene Darstellung

Es ist aufgrund der Abbildungen 7-40 bis 7-46 generell anzunehmen, dass nicht alle Kurven gleich gut erkannt werden und die Geschwindigkeit deshalb teilweise stark angepasst werden muss. Die Abbildungen weisen auch darauf hin, dass eine Sicherheitslinie allein noch kein ausreichendes Hilfsmittel zur Wahl einer optimalen Geschwindigkeit ist.

7.4.3. Tag-Nacht Vergleich

Bei den Messdaten aus dem Forschungsauftrag FA VSS 16/84 (Spacek 1998) wurden bei zwei Messstellen - in Affoltern und in Stallikon - sowohl Tag- als auch Nachtmessungen durchgeführt, mit dem Ziel, Unterschiede im Spurverhalten zu eruieren. In den folgenden Abbildungen sind einige Resultate dargestellt, in der weiteren Auswertung wird aber wegen der geringen Datenmenge nicht weiter darauf eingegangen.

Die Abbildung 7-47 zeigt die prozentuale Verteilung der Spurtypen in zwei Kurven bei Tag und bei Nacht. Die Spuren stammen von Fahrzeugkollektiven zwischen 72 und 123 Fahrzeugen. In beiden Kurven traten am Tag grössere Anteile von Normal-Spuren auf als in der Nacht. Nur Affoltern weist Spuren des Typs „Hinaustragen“ auf, sowohl am Tag wie in der Nacht. Der Anteil des Spurtyps „Schneiden“ ist in Stallikon, bei kleinerem Kurvenradius, stets grösser als in Affoltern. Es lassen sich hier keine Gesetzmässigkeiten ableiten, die auf generelle Unterschiede von Tag zu Nacht hindeuten. Der Einfluss der einzelnen Kurvengeometrien auf die Verteilung der Spurtypen scheint grösser zu sein als die Tageszeit, resp. die Sichtverhältnisse.

Abbildung 7-47: Spurtypenverteilung Tag / Nacht

	Stallikon (Linkskurve)	Affoltern (Rechtskurve)
Radius	79m	115m
Fahrstreifenbreite in Bogenmitte	3.4m	3.4m

Quelle: eigene Darstellung

In Abbildung 7-48 sind die kleinsten gefahrenen Radien (R_{min}) der einzelnen Fahrspuren, getrennt nach Tag/Nacht und Links-/Rechtskurven, den Kurvenradien gegenüber gestellt.

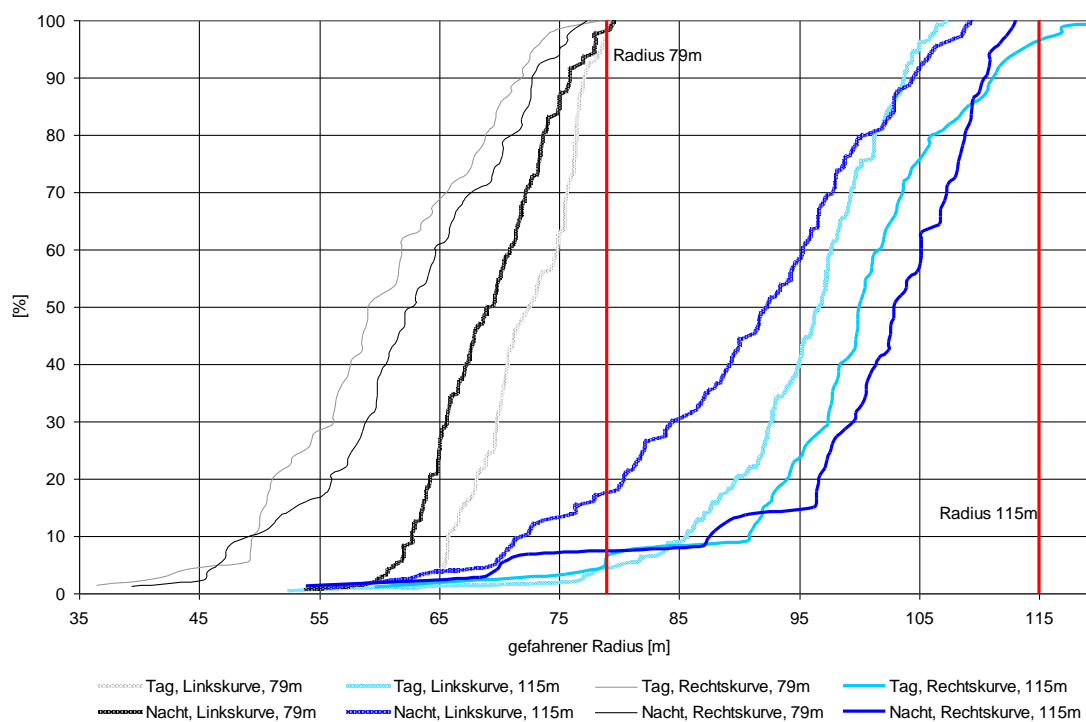
Die gefahrenen Radien liegen fast ausnahmslos unterhalb der vorhandenen Kurvenradien. Beim kleineren Kurvenradius von 79m liegen die gefahrenen Radien im Mittel leicht näher beim vorhandenen Kurvenradius als bei der Kurve mit einem Radius von 115m. Bei diesem ist die Bandbreite der gefahrenen Radien mit gut 60m deutlich grösser als beim kleineren Kurvenradius mit ca. 40m. Beide Kurven haben eine Fahrstreifenbreite in Bogenmitte von 3.4m. Ein grösserer Radius bietet demnach mehr Spielraum in Bezug auf die Radienwahl.

Die Bandbreiten der gefahrenen Kurvenradien sind beim Radius von 79m in der Linkskurve kleiner als in der Rechtskurve, beim grösseren Radius von 115m ist es entgegengesetzt. Beim kleineren Radius werden in der Rechts-

kurve kleinere Radien gefahren als in der Linkskurve, beim grösseren Radius werden in der Linkskurve die grösseren Radien gefahren.

Bezüglich der Unterschiede Tag/Nacht können keine eindeutigen Aussagen gemacht werden.

Abbildung 7-48: Vergleich der Summenkurven von gefahrenem (Rmin) zu Kurvenradius



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 7-49 zeigt die Summenkurven der gefahrenen Radien im Verhältnis zum vorhandenen Kurvenradius. Ein Verhältnis von unter 1.0 bedeutet, dass der gefahrene Radius kleiner als der Radius der Strasse ist. Der Fahrzeuglenker fährt also einen engeren Kurvenradius, als es mit der vorhandenen Projektierungsgeschwindigkeit geplant wäre. Gefahrene Geschwindigkeit und Radius entsprechen u.U. nicht mehr den Projektierungsnormen.

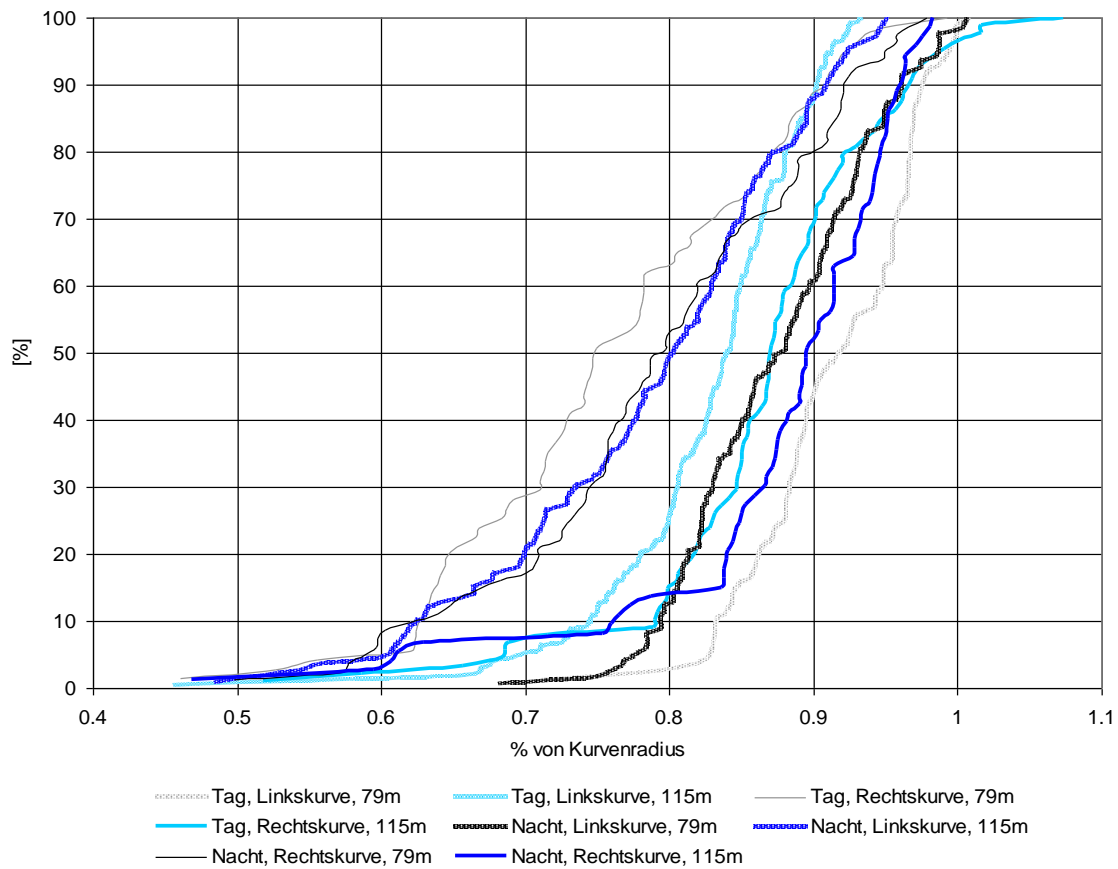
Es zeigen sich Unterschiede bezüglich der einzelnen Summenkurven. Z.B. weisen 50% der gefahrenen Radien „Tag, Rechtskurve, 79m“ ein Verhältnis von ca. 0.75 zum vorhandenen Radius auf, und bei „Nacht, Rechtskurve,

79m“ beträgt es 0.8. Bei den gefahrenen Radien „Tag, Linkskurve, 79m“ beträgt das Verhältnis über 0.9, in der Nacht für die gleiche Kurve 0.85.

Aufgrund der hier analysierten Kurven kann gesagt werden, dass Unterschiede vorhanden sind, dass sie aber nicht ausreichen, um eine eindeutige Aussage zu den gefahrenen gegenüber den vorhandenen Radien zu machen. Es scheint aber richtig, dass teilweise Spuren mit über 40% kleineren Radien gefahren werden können, als der eigentliche Kurvenradius vorgeben würde. Dies bedeutet, dass in einer Kurve, die für 80 km/h ausgelegt ist (Radius = 240m), ein Radius von ca. 140m gefahren wird. Dieser ist aber nur für 65 km/h geplant. Dadurch kann bei nasser Fahrbahn eine ungünstige Fahrdynamik entstehen, die aufgrund der projizierten Kurvenelemente vom Lenker nicht erkannt wird.

Obwohl Unterschiede zwischen gefahrenem und Kurvenradius von über 40% auftreten können, scheinen sie nicht auf unterschiedliche Lichtverhältnisse (Tag/Nacht) zurückzuführen zu sein.

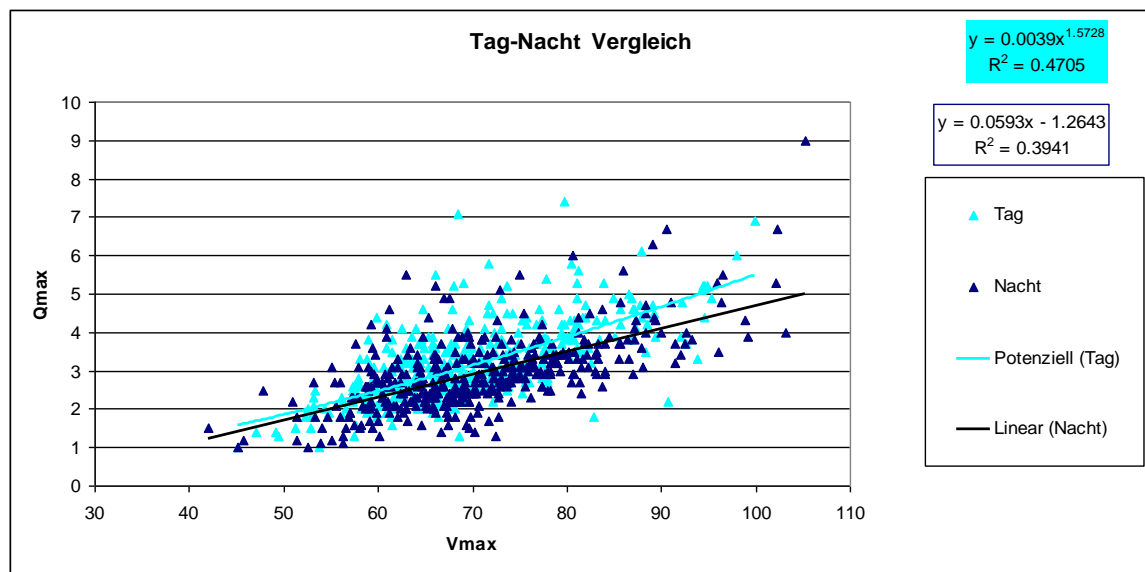
Abbildung 7-49: Vergleich von gefahrenem zu Kurvenradius, Tag-Nacht, Links-Rechts



Quelle: eigene Darstellung

Der in Abbildung 7-50 dargestellte Vergleich von maximaler Geschwindigkeit und maximaler Querbeschleunigung in der Kurve zeigt, dass höhere Geschwindigkeiten mit höheren Querbeschleunigungen einhergehen. Die Unterschiede von Tag zu Nacht sind aber sehr gering.

Abbildung 7-50: Vergleich von Vmax und Qmax bei Tag und Nacht

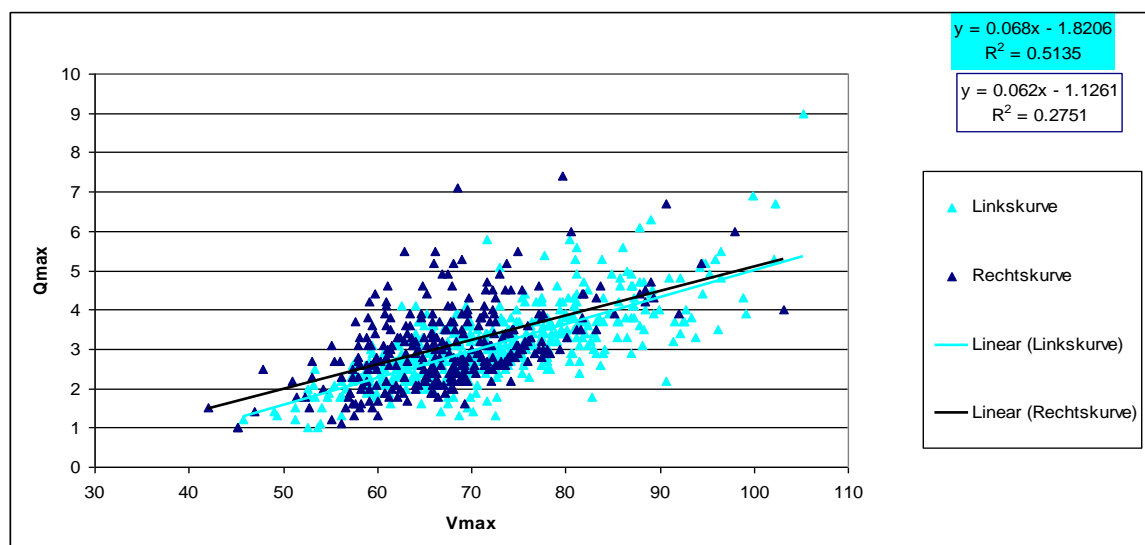


Querbeschleunigung Q = radiale Beschleunigung nach aussen während der Kurvenfahrt

Quelle: eigene Darstellung

Die Unterscheidung nach Links- und Rechtskurven zeigt ebenfalls einen leichten Zusammenhang zwischen der maximalen Geschwindigkeit V_{\max} und der maximalen Querbeschleunigung Q_{\max} , Das Bestimmtheitsmass liegt bei beiden Stichproben aber unter 0.6 (Abb. 7-51).

Abbildung 7-51: Vergleich Vmax und Qmax in Links- und Rechtskurven



Quelle: eigene Darstellung

7.4.4. Resultate der Rough Set Analyse der Spurdaten

Bei der Auswertung mittels Rough Set Analyse konnten die 1585 Spurdaten mit insgesamt 200 Regeln und sechs Attributen beschrieben werden (Abb. 7-52, vollständige Abbildung in Anhang D). Es sind dies Krümmungsrichtung, V_{85} Zufahrt, Rmin/Rkurve, Rmin, Qmax und Vmax. Für die weiteren Auswertungen werden nur noch Regeln, die für mindestens fünf einzelne Spuren gelten, betrachtet. Zudem werden diejenigen Regeln ausgeschlossen, die nur den Spurtyp „Crash“, d.h. undefinierbare oder Spuren mit beispielsweise unrealistisch hohen Querbeschleunigungen, beschreiben. Die Regel mit dem grössten Support, d.h. mit der grössten Anzahl der mit dieser Regel erklärbaren Unfälle, ist Regel Nr. 32 mit 39 Spuren, gefolgt von Regel Nr. 1 mit 35 Spuren und Regeln Nr. 2 und 44 mit je 29 Spuren. Die vier Regeln haben folgende Ausprägung der Attribute.

- Regel Nr. 32: Linkskurve, Rmin/Rkurve 0.75 bis < 1.0 , Qmax 3.0 bis $< 6.0\text{m/s}^2$, Rmin 45-75m, V_{85} Zufahrt 75-80 km/h und Vmax 50-55 km/h.
- Regel Nr. 1: Linkskurve, Rmin/Rkurve 0.75 bis < 1.0 , Qmax $< 3.0\text{m/s}^2$, Rmin 45-75m, V_{85} Zufahrt < 60 km/h und Vmax < 40 km/h.
- Regel Nr. 2: Linkskurve, Rmin/Rkurve 0.75 bis < 1.0 , Qmax $< 3.0\text{m/s}^2$, Rmin 45-75m, V_{85} Zufahrt < 60 km/h und Vmax 40-45 km/h.
- Regel Nr. 44: Rechtskurve, Rmin/Rkurve < 0.75 , Qmax $< 3.0\text{m/s}^2$, Rmin $\geq 175\text{m}$, V_{85} Zufahrt 80-85 km/h und Vmax 55-60 km/h.

Bei den drei Regeln für Linkskurven ist der gefahrene Radius kleiner als der Kurvenradius und liegt unter 75m. Die Differenz zum Geschwindigkeitsniveau der V_{85} ist bei allen drei Regeln mit rund 20 km/h eher hoch. Regel Nr. 44 deutet darauf hin, dass bei grossen minimalen Radien ($> 175\text{m}$) die Differenz von gefahrenem zu Kurvenradius grösser wird. Die Querbeschleunigung ist kleiner als bei den drei Regeln für die Linkskurven.

Abbildung 7-52: Übersicht der Regeln Rough Set Algorithmus „Spur-typ“ (Ausschnitt mit Regeln Nr. 1 bis 67)

	Krümmungsrichtung	Rmin/Rkurve	Qmax	Rmin	V85 Zufahrt	Vmax	LHS Support, "rule strength"							
1	Linkskurve	0.75 bis <1.0	<3.0	45-75m	<60km/h	<40km/h	35							
2						40-45km/h	29							
3						45-50km/h	11							
4					65-70km/h	<40km/h	14							
5						40-45km/h	13							
6						<40km/h	8							
7					70-75km/h	40-45km/h	9							
8						<40km/h	7							
9						40-45km/h	14							
10					75-80km/h	45-50km/h	15							
11						50-55km/h	5							
12						<40km/h	5							
13				75-120m	<60km/h	5								
14					65-70km/h	7								
15				120-175m					7					
16									45-50km/h	21				
17									50-55km/h	17				
18									55-60km/h	16				
19									60-65km/h	9				
20									>90km/h	50-55km/h	8			
21									40-45km/h	9				
22			3.0 bis <6.0					<60km/h	23					
23								45-50km/h	14					
24								55-60km/h	5					
25								45-75m					40-45km/h	10
26													45-50km/h	9
27													50-55km/h	15
28													55-60km/h	12
29													60-65km/h	6
30													40-45km/h	7
31								75-80km/h					45-50km/h	26
32													50-55km/h	39
33													55-60km/h	26
34													60-65km/h	23
35													65-70km/h	9
36													>70km/h	6
37								75-120m	<60km/h	50-55km/h	5			
38								120-175m					80-85km/h	7
39													>70km/h	5
40			>90km/h	60-65km/h	5									
41			65-70km/h	5										
42			>=1.0	>70km/h	9									
43	Rechtskurve	0.75 bis <1.0	<3.0	>=175m	80-85km/h	50-55km/h	18							
44						55-60km/h	29							
45						60-65km/h	22							
46						65-70km/h	12							
47						>70km/h	22							
48						3.0 bis <6.0	20							
49			<3.0					<40km/h	7					
50								45-75m	40-45km/h	8				
51								70-75km/h	45-50km/h	8				
52									<40km/h	12				
53									40-45km/h	18				
54								75-120m	45-50km/h	17				
55									50-55km/h	20				
56									>70km/h	6				
57								>=175m	85-90km/h	45-50km/h	14			
58	50-55km/h	20												
59	55-60km/h	11												
60	60-65km/h	21												
61	3.0 bis <6.0					40-45km/h	14							
62						45-75m	45-50km/h	17						
63						70-75km/h	50-55km/h	21						
64							55-60km/h	9						
65							50-55km/h	9						
66	75-120m	55-60km/h	10											
67		60-65km/h	9											

Quelle: eigene Darstellung

Die vier Regeln mit dem höchsten Support können zusammen 8.3% der Spuren beschreiben. Nimmt man noch diejenigen Regeln dazu, die mindestens 16 Spuren beschreiben, so ergeben sich 22 Regeln, resp. 11% der Regeln, die insgesamt 31.5% der Spuren abdecken (Tab. 7-25).

Tabelle 7-25: Regeln und Anzahl Spuren Rough Set Algorithmus

Anzahl Regeln	in %	Anzahl Spuren	in %
4	2%	132	8.3%
22	11%	500	31.5%
200	100%	1585	100%

Quelle: eigene Darstellung

Die folgende Tabelle (Tab. 7-26) zeigt die Häufigkeiten der einzelnen Spuren je Regel für die ersten 22 Regeln, diese beschreiben je mindestens 1% aller Spuren.

Zum Beispiel sind 36% der Spuren der Regel Nr. 32 vom Spurtyp „Schneiden“.

Tabelle 7-26: Rough Set Analyse, Spurtyp Accuracy*

Regel Nr.	Spurtyp accuracy							
	Ideal	Normal	Ausholen	Schneiden	Hinaustr.	Korr.	übrige	crash
32		8%	5%	36%	8%		44%	
1	3%	6%		20%	9%	3%	60%	
2		45%		24%	3%		28%	
44	7%	10%	3%				79%	
31		8%		31%	12%		50%	
33		4%		38%	23%		27%	8%
22		22%		35%			43%	
34		4%	4%	52%			39%	
45		14%					86%	
47		9%					86%	5%
16		19%		10%	5%	19%	48%	
60		29%		19%			52%	
63		14%		29%	10%		48%	
48		10%			5%		85%	
55		30%	5%	10%	15%		40%	
58	5%	40%		5%			50%	
43	6%	11%					83%	
53	6%	44%	6%	6%		6%	33%	
17		6%		12%	6%	6%	71%	
54		82%		12%			6%	
62		12%		29%		6%	47%	6%
18		6%	6%	19%		13%	56%	

* Accuracy gibt an, wie viel Prozent der Spuren, die durch eine Regel erklärt werden können, einem bestimmten Spurtypen zugeordnet werden können.

Quelle: eigene Darstellung

Die untenstehende Tabelle zeigt, wie viel Prozent aller Spuren eine Regel beschreiben kann (Tab. 7-27). In den Spalten unterhalb der Spurtypen geben die jeweiligen Prozentzahlen an, wie viel Prozent der Spuren, die zum Spurtypen gehören, einer Regel zugeordnet werden können. Beispielsweise erklärt Regel Nr. 44 5.9% der Spuren des Typs „Ausholen“. Insgesamt beschreibt die Regel Nr. 44 einen Anteil von 1.83% an der Gesamtheit aller Spuren (Spalte Cov.*).

Tabelle 7-27: Rough Set Analyse, Spurtyp Coverage*

Regel Nr.	Spurtyp coverage								
	Ideal	Norm.	Aush.	Schn.	Hin.	Korr.	übrige	crash	Cov.*
32		1.5%	11.8%	5.5%	6.7%		3.0%		2.46%
1	12.5%	1.0%		2.8%	6.7%	3.3%	3.7%		2.21%
2		6.5%		2.8%	2.2%		1.4%		1.83%
44	25.0%	1.5%	5.9%				4.0%		1.83%
31		1.0%		3.1%	6.7%		2.3%		1.64%
33		0.5%		3.9%	13.3%		1.2%	0.4%	1.64%
22		2.5%		3.1%			1.7%		1.45%
34		0.5%	5.9%	4.7%			1.6%		1.45%
45		1.5%					3.3%		1.39%
47		1.0%					3.3%	0.2%	1.39%
16		2.0%		0.8%	2.2%	13.3%	1.7%		1.32%
60		3.0%		1.6%			1.9%		1.32%
63		1.5%		2.4%	4.4%		1.7%		1.32%
48		1.0%			2.2%		3.0%		1.26%
55		3.0%	5.9%	0.8%	6.7%		1.4%		1.26%
58	12.5%	4.0%		0.4%			1.7%		1.26%
43	12.5%	1.0%					2.6%		1.14%
53	12.5%	4.0%	5.9%	0.4%		3.3%	1.0%		1.14%
17		0.5%		0.8%	2.2%	3.3%	2.1%		1.07%
54		7.0%		0.8%			0.2%		1.07%
62		1.0%		2.0%		3.3%	1.4%	0.2%	1.07%
18		0.5%	5.9%	1.2%		6.7%	1.6%		1.01%
total	75.0%	46.0%	41.2%	37.0%	53.3%	33.3%	45.8%	0.9%	31.5%

* Die Coverage gibt an, wie viel Prozent aller Spuren mit einer Regel beschrieben werden können

Quelle: eigene Darstellung

Die Rough Set Auswertung konnte zeigen, dass es einige Einflussfaktoren gibt, die die hier betrachteten Fahrspuren gemeinsam haben. Es sind dies z.B. die Krümmungsrichtung (eher Linkskurven) und ein gefahrener Radius, der kleiner ist als der Kurvenradius. Allerdings ist die Anzahl der Regeln mit 200 deutlich grösser als bei den Unfalltypen, d.h. für die Beschreibung der Spurtypen müssen mehr verschiedene Kombinationen von Einflussfaktoren verwendet werden, um alle Spuren zu erfassen.

7.4.5. Zusammenfassung der Resultate aus den Spurdaten

Aufgrund der Auswertung der empirischen Spurdaten konnten erste Erkenntnisse gewonnen und einige Aussagen aus der Literaturrecherche überprüft werden. Dies gelang, obwohl nicht alle der ursprünglich gemessenen Kurven in die Analyse einfließen.

Resultate Regressionsanalyse vs. Resultate Rough Set Algorithmus

Den grössten Einfluss auf die Spurtypen haben die Faktoren der Breite der Zufahrtsgeraden und der Bogenmitte, die Sichtweite, die Sicherheitslinie sowie die Streckencharakteristik und Randmarkierungen. Ebenfalls einen Einfluss haben die Kurvenlage, die Höchstgeschwindigkeit und der Streckentyp. Die Krümmungsrichtung, die V_{85} auf der Zufahrtsgeraden und das Verhältnis von minimal gefahrenem zum Kurvenradius sind Faktoren, die in der Rough Set Analyse zum Tragen kamen.

Die gefundenen Einflussfaktoren sind in der Tabelle 7-28 dargestellt.

Tabelle 7-28: Einflussfaktoren Spurtyp

Methode	Gefundene Einflussfaktoren auf das Spurverhalten
Regressionsanalyse	Breite der Zufahrtsgeraden, Breite in Bogenmitte, Sicht nach innen, Sicherheitslinie durchgezogen, Streckencharakteristik, Randmarkierung. Kurvenlage, Höchstgeschwindigkeit und Streckentyp
Rough Set Analyse	Krümmungsrichtung, V_{85} Zufahrt, Rmin/Rkurve, Rmin, Qmax und Vmax

Quelle: eigene Darstellung

Wie bereits bei der Auswertung der Unfalldaten weisen auch bei den Spurdaten die Regressionsanalyse und die Rough Set Analyse unterschiedliche Ergebnisse auf. Möglicherweise ist auch hier die Stichprobe zu klein oder die Attribute sind in zu detaillierte Kategorien aufgeteilt.

Resultate vs. Literatur

Die hier gefundenen Resultate werden nachfolgend mit den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche verglichen.

- Schmale Fahrstreifenbreiten der Zufahrtsgeraden von bis zu 3m begünstigen die Spurtypen „Korrigieren“, „Schneiden“, „Ausholen“ und „Hinaustragen“.

Verschiedene Studien (Friedinger 1982) fanden heraus, dass sich das Verhalten des Fahrers nach dem optischen Erscheinungsbild des Strassenraumes richtet. Dieses optische Erscheinungsbild wird u.a. durch die Fahrbahnbreite und die Seitenraumbepflanzung erzeugt. Es konnte hier somit bestätigt werden, dass die Fahrstreifenbreite einen Einfluss auf das Spurverhalten hat.

- Die grössten Geschwindigkeitsdifferenzen bzw. Verzögerungen treten bei offener Sicht auf. Die grössten Differenzen zwischen Zufahrt und Bogenanfang weisen die Spurtypen „Korrigieren“, „Ausholen“ und „Hinaustragen“ auf.
- In Kurven mit eingeschränkter Sichtweite wird im Schnitt weniger stark abgebremst und es wird im Bereich des Kurvenbogens schon wieder beschleunigt. Bei offener Sicht ist die Spannweite der Geschwindigkeitsreduktion grösser.

Das bestätigt die Resultate von Lippold (Lippold, Dietze et al. 2006), der herausfand, dass eine Sichtbehinderung durch Bepflanzung in der Kurveninnenseite weniger „Kurvenschneiden“ zur Folge hat. Beim Spurtypen „Schneiden“ wird weniger stark abgebremst, d.h. die Geschwindigkeitsdifferenzen sind kleiner. Bei den Spurtypen „Korrigieren“, „Ausholen“ und „Hinaustragen“ besteht ein Gefährdungspotential beim Bremsen. Dabei kann die eigene Geschwindigkeit unterschätzt werden (Denton 1966). Weiter kann das Fahrzeug bei gleichzeitigem Bremsen und Lenken instabil werden, da durch das Bremsen weniger radiale Haftreibung zur Verfügung steht oder durch das Abbremsen die Gewichtskraft nicht gleichmässig auf alle vier Räder verteilt wird.

- Die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Zufahrtsgerade und Bogenanfang sind allgemein grösser, wenn keine durchgezogene Sicherheitslinie vorhanden ist. Die grössten Differenzen weisen die Spurtypen „Ideal“, „Korrigieren“, „Schneiden“ und „Ausholen“ auf. Eine durchgezogene Sicherheitslinie hilft dem Lenker offenbar dabei, eine angepasste Geschwindigkeit zu wählen.
- Generell hat eine Sicherheitslinie ein homogeneres Geschwindigkeitsniveau mit kleineren Differenzen zur Folge.
- Eine durchgezogene Sicherheitslinie begünstigt die Spurtypen „Normal“, „Hinaustragen“ und „Übrige“. Wenn keine durchgezogene Sicherheitslinie vorhanden ist, treten im Verhältnis mehr Spurtypen „Ideal“, „Korrigieren“, „Schneiden“ und „Ausholen“ auf.

Betrachtet man die Geschwindigkeitswahl in der Kurve, so führt eine bessere und frühzeitigere Wahrnehmung der Kurve tendenziell zu einem höheren und stetigeren Geschwindigkeitsniveau (Landwehr 1991; Weise, Steyer

1999; Steyer 2004). In Kurven ohne Sicherheitslinie ist die Wahrnehmung offenbar schlechter als mit einer solchen Linie und führt deshalb zu grösseren Geschwindigkeitsdifferenzen.

- Eine gestreckte Streckencharakteristik begünstigt die Spurtypen „Ideal“, „Korrigieren“, „Ausholen“ und „Übrige“. Wenn die Strecke kurvig ist, treten im Verhältnis mehr Spurtypen „Normal“, „Schneiden“ und „Hinaustragen“ auf.

Weiter ist aber auch die Erwartungshaltung der Lenker von Bedeutung (Dilling 1973). Auf einer zügig trassierten Strecke mit wenigen Kurven mit kleinen Richtungsänderungswinkeln wird nicht erwartet, dass plötzlich eine Kurve mit kleinem Radius und grossem Richtungsänderungswinkel befahren werden muss.

Es ist zu vermuten, dass bei einer grossen Kurvigkeit das subjektive Sicherheitsempfinden kleiner ist und deshalb langsamer bzw. angepasster gefahren wird.

Resultate vs. Hypothesen

Aus der vorliegenden Spurdatenanalyse können bezüglich der Hypothesen (vgl. Kapitel 3) folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

→ *Es gibt Elemente einer Kurve, die das Spurverhalten massgeblich beeinflussen. Es sind dies hauptsächlich Radius, Fahrbahnbreite, Markierungen (Rand- und/oder Mittellinien) und die Grösse der Richtungsänderung.*

Ja, die Fahrbahnbreiten und das Vorhandensein einer Sicherheitslinie beeinflussen das Spurverhalten. Hingegen haben der Radius und die Grösse des Richtungsänderungswinkels keinen Einfluss.

→ *Das Spurverhalten in einer Kurve entlang einer inhomogenen Strecke unterscheidet sich vom Spurverhalten in einer Kurve entlang einer homogen trassierten Strecke.*

Ja, dies trifft zu. Bei kurvigen Strecken treten eher die Spurtypen „Normal“, „Schneiden“ und „Hinaustragen“ auf, bei gestreckten Abschnitten eher die Typen „Ideal“, „Korrigieren“, „Ausholen“ und „Übrige“.

→ *Das Spurverhalten einer Kurve mit Mittel-, aber ohne Randlinie unterscheidet sich signifikant von demjenigen einer Kurve mit Rand- und Mittellinien.*

→ *Fehlende Randmarkierungen führen zu einer bezüglich Sicherheit ungünstigen Spurverteilung.*

→ *In Kurven mit Randmarkierungen und höheren Geschwindigkeiten sind vermehrt die Spurtypen „Schneiden“, „Ausholen“ oder „Hinaustragen“ zu finden.*

Die Hypothesen bezüglich Randmarkierungen können aufgrund ungenügender Datenlage nicht beurteilt werden. Eine vorhandene Sicherheitslinie begünstigt höhere Geschwindigkeiten. Möglicherweise ermöglicht sie dem Lenker eine bessere optische Führung und damit ein höheres Sicherheitsempfinden. Es kann deshalb vermutet werden, dass Randmarkierungen dieses Gefühl noch verstärken könnten. Fehlende Randmarkierungen müssten demzufolge nicht unbedingt zu einer ungünstigen Spurverteilung führen.

→ *Grosse Geschwindigkeitsdifferenzen im Anfahrt- und im Kurvenscheitelbereich sind ein Indiz für schlechte oder späte Erkennbarkeit einer Kurve.*

Bei grossen Geschwindigkeitsdifferenzen treten eher die Spurtypen „Korrigieren“, „Ausholen“ und „Hinaustragen“ auf. Sie sind jedoch kein eindeutiges Indiz für eine schlechte oder späte Erkennbarkeit.

→ *Kurven mit einer inhomogenen Geschwindigkeitsverteilung weisen eine andere Spurtypenverteilung und eine höhere Unfallwahrscheinlichkeit auf als Kurven mit homogenen Geschwindigkeiten.*

Eine andere Spurverteilung tritt auf, aber die Unfallwahrscheinlichkeit kann nicht abschliessend beschrieben werden. Die Spurtypen „Schneiden“, „Ausholen“ und „Hinaustragen“ weisen eine grössere Bandbreite von Geschwindigkeitsdifferenzen auf. Sie sind somit ein Indiz für Kurven mit einer inhomogenen Geschwindigkeitsverteilung.

Resultate vs. Fehlerbaum (Netzdiagramm und Gefährdungsindex)

Für die Verfeinerung der Berechnung des Indexes für die Gefährlichkeit einer Kurve sind mit den Erkenntnissen aus der Analyse der Spurdaten möglicherweise Gewichtungsfaktoren für die Fahrbahnbreiten der Zufahrtsgeraden, die Streckencharakteristik und Faktoren für die Sicht und Markierung in Betracht zu ziehen. Gewisse Faktoren könnten als Gewichtung der Spurtypenhäufigkeiten eingesetzt werden.

Für einen negativen Einfluss eines Faktors wird eine Gewichtung grösser eins eingesetzt (Tab. 7-29). Wie stark ein Faktor gewichtet werden soll, kann mit der vorliegenden Arbeit nicht abschliessend bestimmt werden. Dazu sind weitere, konkretere Untersuchungen notwendig.

Tabelle 7-29: mögliche weitere Faktoren für Gefährdungsindex I (Spurtypen)

Faktor	Beschrieb	
Fahrbahnbreiten der Zufahrtsgeraden f	...bei Breiten kleiner gleich 3.0m ...sonst	f > 1 f = 1
Streckencharakteristik g	...bei einer Kurve nach einem längeren gestreckten Strassenabschnitt → Korrigieren, Ausholen	g > 1
	...kurvige Strecke → Schneiden, Hinaustragen	g > 1
Sicht p	...für Kurven mit offener Sicht → Korrigieren, Ausholen, Hinaustragen	p > 1
Vorhandene Markierung q	...wenn keine Sicherheitslinie vorhanden ist → Korrigieren, Ausholen und Schneiden	q > 1
	...Sicherheitslinie vorhanden → Hinaustragen	q > 1

Quelle: eigene Darstellung

8. Zusammenhänge und Ergebnisdiskussion, Beantwortung der Hypothesen

8.1. Allgemeine Aussagen zu den Resultaten

Es konnten in der vorliegenden Arbeit erste Aussagen zu möglichen Einflussfaktoren, die das Unfallgeschehen und die Spurverteilung in Kurven negativ beeinflussen, gemacht werden.

In den Kapiteln 8.2 und 8.3 wird näher auf die gefundenen Resultate eingegangen.

8.2. Resultate aus den Unfalldaten

Den grössten Einfluss auf die Unfalltypen haben die Breite der Zufahrtsgeraden und der Bogenmitte sowie die Streckencharakteristik.

Negativ auf die Häufigkeit der Unfälle wirken sich sehr schmale oder sehr breite Fahrbahnen aus. Eine schmale Fahrbahn (unter 3.3m) verzeiht weniger Lenkfehler, was sich bei der Häufung der Unfälle „Kollision mit Gegenverkehr, mit und ohne Überholen“, zeigt. Eine zu breite (> 4.2m) Fahrbahn gibt dem Fahrer unter Umständen zu wenig Hilfestellung bei der Wahl der seitlichen Abstände, und in der Folge treten vermehrt Unfalltypen „Ausweichen ohne Kollision“ und „Streifen mit Gegenverkehr ohne Überholen“ auf. Eine gestreckte Strecke mit einer einzelnen Kurve wirkt sich ebenso negativ aus. Die Erwartungshaltung der Fahrzeuglenker an einen vorausliegenden Streckenabschnitt stammt aus der zuvor gerade befahrenen Strecke. Eine unvermittelt auftauchende Kurve passt demzufolge nicht ins abgespeicherte Bild der Strasse, das der Lenker momentan hat. Die Wahl der Geschwindigkeit entspricht so möglicherweise nicht derjenigen, die für die vorausliegende Kurve angebracht wäre. Der Lenker muss dadurch stärker

abbremsen und überschätzt in der Folge seine Geschwindigkeit eher, als wenn er die Kurve mit konstanter Geschwindigkeit befahren könnte.

Weiter erweist sich eine durchgezogene Sicherheitslinie für das Unfallgeschehen als negativ. Der Lenker hat durch die optische Führung ein grösseres Sicherheitsempfinden und fährt deshalb möglicherweise zu schnell.

Die Sichtweite hat je nach Unfalltyp einen unterschiedlichen Einfluss.

Die folgende Tabelle (Tab. 8-1) zeigt qualitativ auf, bei welchen Einflussfaktoren welche Unfalltypen eher auftreten können. Die Wertung wurde aufgrund der Resultate aus Kapitel 7.3.6 gemacht.

Tabelle 8-1: Einflussfaktoren und Unfalltypen, Einflussgrösse

		Unfalltyp Nr.						
		01	03	05	06	10	60	61
Sicherheitslinie	ja	+	+	++	++	++	+	++
	nein							
Fahrstreifenbreite in Kurvenmitte	schmal					++	++	
	breit				++			++
Sichtweite	eingeschränkt	+	+				++	
	begrenzt	+	+	+	++	++	+	+
	offen	+	+	+				+
Streckencharakteristik	gestreckt	+	+	+	+	+	+	+
	kurvig							
+ Einfluss vorhanden ++ grosser Einfluss vorhanden								

Unfalltypen und Beschreibung:

- 01 ohne Kollision
- 03 Kollision mit Hindernis ausserhalb der Fahrbahn
- 05 Kollision mit anderem Verkehrsteilnehmer
- 06 Beim Ausweichen, ohne Kollision
- 10 Kollision mit Gegenverkehr
- 60 Frontalkollision mit Gegenverkehr, ohne Überholen
- 61 Streifen mit Gegenverkehr, ohne Überholen

Quelle: eigene Darstellung

Stellt man die obenstehende Tabelle um, so zeigt sich, dass eine Kurve mit Sicherheitslinie auf einer gestreckten Strecke und begrenzter Sichtweite potentiell gefährlich ist (Tab. 8-2). Der Faktor Sichtweite lässt sich allerdings nicht uneindeutig einem Unfalltypen zuordnen.

Tabelle 8-2: Einflussfaktoren und Unfalltypen

		Unfalltyp Nr.						
		01	03	05	06	10	60	61
Sicherheitslinie	ja							
Streckencharakteristik	gestreckt							
Sichtweite	begrenzt							
Sichtweite	offen							
Sichtweite	eingeschränkt							
Fahrbahnbreite	schmal							
Fahrbahnbreite	breit							

Unfalltypen und Beschreibung:

- 01 ohne Kollision
- 03 Kollision mit Hindernis ausserhalb der Fahrbahn
- 05 Kollision mit anderem Verkehrsteilnehmer
- 06 Beim Ausweichen, ohne Kollision
- 10 Kollision mit Gegenverkehr
- 60 Frontalkollision mit Gegenverkehr, ohne Überholen
- 61 Streifen mit Gegenverkehr, ohne Überholen

Quelle: eigene Darstellung

Aus den Resultaten der Rough Set Analyse ergeben sich die folgenden relevanten Faktoren für die Beschreibung der Unfalltypen:

- Strassenbeleuchtung
- Krümmungsrichtung
- Radius
- Kurvenlage
- Höchstgeschwindigkeit
- Quergefälle p in Bogenmitte

Die mit der Rough Set Analyse erhaltenen Regeln für die Beschreibung der Unfalltypen geben prozentuale Häufigkeiten für bestimmte Ausprägungen der Einflussfaktoren an. Eine Regel gilt meist nicht nur für einen Unfalltypen, sondern sie beschreibt eine Kombination von verschiedenen Typen.

8.3. Resultate aus den Spurdaten

Den grössten Einfluss auf die Spurtypen haben die Breite der Zufahrtsgeraden und der Bogenmitte, die Sichtweite, die Sicherheitslinie sowie die Streckencharakteristik. Die folgende Tabelle (Tab. 8-3) gibt einen qualitativen Überblick, welche Faktoren eher zu welchen Spurtypen führen. Die Tabelle wurde aufgrund der Aussagen in Kapitel 7.4.5 erstellt.

Tabelle 8-3: Einflussfaktoren und Spurtypen, Einflussgrösse

		Spurtypen						
		1, Ideal	2, Normal	unerwünschte Spurtypen				7, Übrige
				3, Korrigieren	4, Schneiden	5, Ausholen	6, Hinaustragen	
Fahrstreifenbreite	schmal			+	+	+	+	+
	breit	+	+					
Sichtweite	eingeschränkt							
	begrenzt				+			
	offen			++	+	++	+	+
Sicherheitslinie	ja							
	nein	+		+	+	+		
Strecken- charakteristik	gestreckt	+		+		+		+
	kurvig		+		+		+	
$R_{\min}/R_{\text{Kurve}}$	< 0.8			+				
	> 0.8				+			
R_{Kurve}	< 100m					+		
	< 150m		+		+		+	+
	> 150m	+		+				

+ Einfluss vorhanden

++ grosser Einfluss vorhanden

Quelle: eigene Darstellung

Stellt man die obenstehende Tabelle um, so zeigt sich, dass eine schmale Fahrbahn und eine offene Sichtweite die unerwünschten Spurtypen 3 bis 7 fördern (Tab 8-4). Kommt noch eine gestreckte Strecke ohne Sicherheitslinie hinzu, so sind die Spurtypen „Korrigieren“ und „Ausholen“ eher zu erwarten. Bei einer kurvigen Strecke mit schmaler Fahrbahn und offenen Kurve treten eher die Typen „Schneiden“ oder „Hinaustragen“ auf.

Tabelle 8-4: Einflussfaktoren und Spurtypen

		3, Korrigieren	5, Ausholen	7, Übrige	4, Schneiden	6, Hinaustragen
Fahrstreifenbreite	schmal					
Sichtweite	offen					
Streckencharakteristik	gestreckt					
Sicherheitslinie	nein					
Streckencharakteristik	kurvig					
R_{Kurve}	< 100m					
R_{Kurve}	< 150m					
R_{Kurve}	> 150m					
Sichtweite	begrenzt					
$R_{\text{min}}/R_{\text{Kurve}}$	< 0.8					
$R_{\text{min}}/R_{\text{Kurve}}$	> 0.8					

Quelle: eigene Darstellung

Aus den Resultaten der Rough Set Analyse ergaben sich die folgenden relevanten Faktoren für die Beschreibung der Spurtypen:

- Krümmungsrichtung
- V_{85} Zufahrt
- R_{min}/R_{kurve}
- R_{min}
- Q_{max}
- V_{max}

8.4. Vergleich der beiden Auswertungen Unfalldaten und Spurdaten

Das Ziel dieser Arbeit war, einen Zusammenhang zwischen Spurverhalten und Unfallgeschehen zu finden. Da die erfassten Daten nicht aus der gleichen Stichprobe stammen, wurde versucht, Einflussfaktoren getrennt für Unfalltypen und Spurdaten zu finden und diese im Anschluss zu vergleichen.


Es hat sich gezeigt, dass die Faktoren offene Sichtweite, schmale Fahrbahn und gestreckte Streckenführung sowohl bei den Unfalltypen als auch bei den Spurtypen einen ungünstigen Einfluss haben können. Allerdings können weiterhin keine eindeutigen Zuordnungen aller Faktoren der Unfalltypen zu den Spurtypen gemacht werden.

Die folgende Tabelle (Tab. 8-5) zeigt die Unfalltypen (Nummern), die im Zusammenhang mit den jeweiligen ungünstigen Spurtypen (graue Felder) auftreten können.

Ein leichter Widerspruch ergibt sich beim Faktor Sicherheitslinie. Keine Sicherheitslinie begünstigt die Spurtypen „Korrigieren“, „Ausholen“ und „Schneiden“, bei den Unfalltypen hingegen führt eine vorhandene Sicherheitslinie eher zu Unfällen.

Tabelle 8-5: Einflussfaktoren von Unfall- und Spurtypen

Einflussfaktor		3, Korrigieren	5, Ausholen	4, Schneiden	6, Hinaustragen
Fahrstreifenbreite	schmal	10, 60	10, 60	10, 60	10, 60
Sichtweite	offen	1, 3, 5, 61	1, 3, 5, 61	1, 3, 5, 61	1, 3, 5, 61
Strecken- charakteristik	gestreckt	1, 3, 5, 6, 10, 60, 61	1, 3, 5, 6, 10, 60, 61		
Sicherheitslinie	nein				1, 3, 5, 6, 10, 60, 61

 Spurtyp tritt bei diesem Einflussfaktor auf

Unfalltypen und Beschreibung:

- 01 ohne Kollision
- 03 Kollision mit Hindernis ausserhalb der Fahrbahn
- 05 Kollision mit anderem Verkehrsteilnehmer
- 06 Beim Ausweichen, ohne Kollision
- 10 Kollision mit Gegenverkehr
- 60 Frontalkollision mit Gegenverkehr, ohne Überholen
- 61 Streifen mit Gegenverkehr, ohne Überholen

Quelle: eigene Darstellung

Es zeigt sich, dass sich v.a. die Spurtypen „Korrigieren“ und „Ausholen“ ungünstig auf das Unfallgeschehen auswirken können, „Schneiden“ und „Hinaustragen“ wirken sich v.a. bei schmalen Fahrstreifenbreiten und offener Sicht negativ aus.

Um die relevanten Einflussfaktoren und die Spurtypen noch stärker miteinander zu verknüpfen, wird die Gleichung für den Gefährlichkeitsindex noch um die Erkenntnisse aus den Analysen der empirischen Daten erweitert.

Die ursprüngliche Gleichung aus Kapitel 5.10.5 muss anhand der gefundenen Resultate aus der Analyse der Unfall- und der Spurdaten noch mit allgemeinen Faktoren für die Fahrstreifenbreite, die Streckencharakteristik und die Markierung (Sicherheitslinie) ergänzt werden.

Für die Gewichtung der Unfalltypen sind zusätzliche Faktoren für begrenzte Sichtweiten und für Linkskurven, für die Gewichtung der Spurtypen zusätzliche Faktoren für kurvige Strecken und fehlende Sicherheitslinien erforderlich.

Bei den Faktoren für die Spurtypen muss je nach Faktor nur bei bestimmten Spurtypen eine höhere Gewichtung gewählt werden (Tab. 8-6).

Tabelle 8-6: mögliche weitere Faktoren für Gefährdungsindex I

	Stärkere Gewichtung bei... (>1.0)	
Faktor	Unfalltypen	Spurtypen
Fahrstreifenbreiten	bei sehr schmalen oder sehr breiten Fahrbahnen	bei Breiten kleiner gleich 3.0m
Streckencharakteristik	bei einer Kurve nach einem längeren gestreckten Strassenabschnitt	bei einer Kurve nach einem längeren gestreckten Strassenabschnitt → Korrigieren, Ausholen
	-	kurvige Strecke → Schneiden, Hinaustragen
Sichtweite	für Kurven mit begrenzter Sicht	für Kurven mit offener Sicht → Korrigieren, Ausholen, Hinaustragen
Vorhandene Markierung	wenn eine Sicherheitslinie vorhanden ist	Sicherheitslinie vorhanden → Hinaustragen
	-	wenn keine Sicherheitslinie vorhanden ist → Korrigieren, Ausholen und Schneiden
Krümmungsrichtung	für Linkskurven	-

Quelle: eigene Darstellung

Die Gleichung für den Gefährdungsindex lautet:

$$I = \sum (K_n \cdot (\sum S_i) \cdot (\sum U_j) \cdot B_m)$$

- I = Index für die Gefährlichkeit einer Kurve
 K_n = Faktor für die Gewichtung des Kurvenortes n, n = [1, 5]
 B_m = Faktor für die Endlage und Bewegungsart des Unfallfahrzeuges,
m = [1, 4]
 S_i = Faktor für Spurtyp i, i = [1, 6]
 U_j = Faktor für Unfalltyp j, j = [1, 7]

Die folgenden Gewichtungen könnten die ursprüngliche Gleichung ergänzen (Tab. 8-7):

Tabelle 8-7: Gewichtung der weiteren Faktoren für Gefährdungsindex I

Faktor	Stärkere Gewichtung bei...		
		Unfalltypen	Spurtypen
Fahrstreifen- breiten	bei Breiten kleiner gleich 3.0m	$a_u = f(U_j)$ $j = [1, 7]$	$a_s = f(S_i)$ $i = [1, 6]$
	bei sehr breiten Fahrbahnen		-
Strecken- charakteristik	bei einer Kurve nach einem längeren gestreckten Strassenabschnitt	$C_u = f(U_j)$ $j = [1, 7]$	$C_{sg} = f(S_i)$ $i = \text{Korrigieren,}$ Ausholen
	kurvige Strecke	-	$C_{sk} = f(S_i)$ $i = \text{Schneiden,}$ Hinaustragen
Sichtweite	für Kurven mit begrenzter Sicht	$X_u = f(U_j)$ $j = [1, 7]$	-
	für Kurven mit offener Sicht	-	$X_s = f(S_i)$ $i = \text{Korrigieren,}$ Ausholen, Hinaustragen
Vorhandene Markierung	wenn eine Sicherheitslinie vorhanden ist	$Y_u = f(U_j)$ $j = [1, 7]$	$Y_s = f(S_i)$ $i = \text{Hinaustragen}$
	wenn keine Sicher- heitslinie vorhanden ist	-	$Y_s = f(S_i)$ $i = \text{Korrigieren,}$ Ausholen und Schneiden
Krümmungs- richtung	Linkskurven	$Z_u = f(U_j)$ $j = [1, 7]$	-

Mit den oben beschriebenen neuen Faktoren für die Gewichtung lautet die Gleichung für den Gefährdungsindex I wie folgt:

$$I = \sum \left(K_n \cdot \left(\sum S_i (a_s \cdot C_{sg} \cdot C_{sk} \cdot X_s \cdot Y_s) \right) \cdot \left(\sum U_j (a_u \cdot C_u \cdot X_u \cdot Y_u \cdot Z_u) \right) \cdot B_m \right)$$

- I = Index für die Gefährlichkeit einer Kurve
 K_n = Faktor für die Gewichtung des Kurvenortes n , $n = [1, 5]$
 B_m = Faktor für die Endlage und Bewegungsart des Unfallfahrzeuges, $m = [1, 4]$
 S_i = Faktor für Spurtyp i , $i = [1, 6]$
 U_j = Faktor für Unfalltyp j , $j = [1, 7]$

Die Faktoren a_s , a_u , C_{sg} , C_{sk} , C_u , X_s , X_u , Y_s , Y_u , Z_u erhalten eine Gewichtung > 1 gemäss den Definitionen in der Tabelle oben (Tab. 8-7). In allen anderen Fällen erhalten sie den Wert 1.

Wie stark die Gewichtung der einzelnen Faktoren sein muss, kann mit der vorhandenen Datenmenge nicht bestimmt werden. Dazu wären weitere, vertiefte Datenerfassungen notwendig.

8.5. Beantwortung der Hypothesen und offene Fragen

Im folgenden Kapitel sollen die Hypothesen aufgrund der Resultate aus den Kapiteln 7 und 8.2 bis 8.4 beantwortet werden und noch offene Fragen diskutiert werden. Zum besseren Verständnis sind die Hypothesen aus Kapitel 3 nochmals aufgeführt.

H: Kurven mit unterschiedlichen geometrischen Eigenschaften weisen Spurtypenverteilungen auf, welche sich signifikant voneinander unterscheiden.

A.: Ja, Fahrbahnbreite und Radius haben einen Einfluss auf das Spurverhalten. Eine schmale Fahrbahn und ein bestimmter Radius (je nach Spurtyp) führen je nach Spurtyp eher zu erhöhten Häufigkeiten von bestimmten Spurtypen.

→ Hypothese konnte eindeutig bestätigt werden.

H: Es gibt Elemente einer Kurve, die das Spurverhalten massgeblich beeinflussen. Es sind dies hauptsächlich Radius, Fahrbahnbreite und Markierungen (Rand- oder Mittellinien).

A: Radius und Fahrbahnbreite beeinflussen das Spurverhalten, bei der Markierung spielt vor allem das Vorhandensein einer Sicherheitslinie eine Rolle. Rand- und gestrichelte Mittellinien haben keinen signifikanten Einfluss.

→ Hypothese konnte eindeutig bestätigt werden.

H: Das Spurverhalten in einer Kurve entlang einer inhomogenen Strecke unterscheidet sich vom Spurverhalten in einer Kurve entlang einer homogen trassierten Strecke.

A: Ja, eine inhomogen trassierte gestreckte Strecke, mit einer Kurve, führt eher zu ungünstigen Spurtypen. Es sind dies die Typen „Korrigieren“ und „Ausholen“.

→ Hypothese konnte eindeutig bestätigt werden.

H: Das Spurverhalten einer Kurve mit Mittel-, aber ohne Randlinie unterscheidet sich signifikant von demjenigen einer Kurve mit Rand- und Mittellinie.

A: Diese Hypothese konnte so nicht bestätigt werden. Die Randlinien waren kein signifikanter Einflussfaktor.

→ Hypothese konnte nicht bestätigt werden.

H: Fehlende Randmarkierungen führen zu einer ungünstigen Spurverteilung.

A: Diese Hypothese konnte ebensowenig bestätigt werden. Offen bleibt, ob die Resultate anders ausgefallen wären, wenn mehr Kurven ohne Randlinien betrachtet worden wären.

→ Hypothese konnte nicht bestätigt werden.

H: In Kurven mit Randmarkierungen und höheren Geschwindigkeiten sind vermehrt die Spurtypen „Schneiden“, „Ausholen“ oder „Hinaustragen“ zu finden.

A: Die Randmarkierungen haben keinen Einfluss auf die Spurtypen, allerdings treten bei höheren Geschwindigkeiten vermehrt Spuren des Typs „Schneiden“ auf.

→ Hypothese konnte teilweise bestätigt werden.

H: Grosse Geschwindigkeitsdifferenzen im Anfahrt- und im Kurvenscheitelbereich sind ein Indiz für schlechte oder späte Erkennbarkeit einer Kurve.

A: In Kurven ohne Sicherheitslinie weisen grosse Geschwindigkeitsdifferenzen eher auf ungünstige Spurtypen („Korrigieren“, „Schneiden“, „Ausholen“) hin. Ob das ein Indiz für eine schlechte oder späte Erkennbarkeit ist, kann aufgrund der vorhandenen Daten nicht eindeutig festgestellt werden.

→ Hypothese konnte nicht eindeutig bestätigt werden.

H: Kurven mit einer inhomogenen Geschwindigkeitsverteilung weisen eine andere Spurtypenverteilung und eine höhere Unfallwahrscheinlichkeit auf als Kurven mit homogenen Geschwindigkeiten.

A: Die Kurven weisen unterschiedliche Spurtypen auf, die höhere Unfallwahrscheinlichkeit konnte so nicht bestätigt werden.

→ Hypothese konnte nicht bestätigt werden.

H: Es gibt Elemente einer Kurve, die sowohl das Auftreten bestimmter Unfalltypen als auch das Vorhandensein bestimmter Spurtypen signifikant beeinflussen.

A: Ja, es sind dies die Streckencharakteristik, die Fahrbahnbreite und die Sichtweite.

→ Hypothese konnte eindeutig bestätigt werden.

9. Synthese

9.1. Beantwortung der Forschungsfrage

Ziel dieser Arbeit war es herauszufinden, ob ein Zusammenhang zwischen dem Spurverhalten und dem Unfallgeschehen in einer Kurve besteht (vgl. 1.2).

Kann anhand der Struktur des Spurverhaltens einer Kurve auf einen Zusammenhang zwischen Unfallgeschehen und Spurverhalten geschlossen werden? Und wenn ja, wie sieht diese Verteilung der Spurtypen aus?

Alleine aufgrund der Struktur des Spurverhaltens konnte nicht auf einen Zusammenhang geschlossen werden. Die Wirkungsmechanismen zwischen Wahrnehmung, Fahrverhalten, Kurve und Unfallgeschehen erwiesen sich als zu komplex, um sie mit den vorliegenden Daten vollständig zu entschlüsseln. Es gab schlicht zu viele Einflussfaktoren, die für zu viele Unfall- und Spurtypen verantwortlich und nicht eindeutig einem Unfall- oder Spurtypen zuweisbar waren. Deshalb wäre es möglicherweise sinnvoller, mit Summen von unerwünschten Spurtypen („Ausholen“, „Schneiden“, „Korrigieren“, „Hinaustragen“) sowie Summen aller kurvenrelevanten Unfälle zu arbeiten.

Es konnten aber Faktoren gefunden werden, die einen ungünstigen Einfluss auf das gesamte Unfallgeschehen und Spurverhalten hatten. Diese Faktoren begünstigen das Auftreten von Unfällen und unerwünschten Spurtypen „Ausholen“, „Schneiden“, „Korrigieren“ und „Hinaustragen“. Es zeigte sich, dass eine vorhandene Sicherheitslinie, eine schmale Fahrbahn und eine Kurve nach einem längeren gestreckten Strassenabschnitt sowohl bei den Unfalltypen als auch bei den Spurtypen einen ungünstigen Einfluss haben konnten.

Wie bereits in der Fehlerbaumanalyse vermutet, wurden nicht ein sondern mehrere relevante Einflussfaktoren gefunden. In der vorliegenden Arbeit konnte erstmals aufgezeigt werden, dass eine Kombination von Faktoren, die

normgerecht ausgeführt wurden und einzeln nicht als ungünstig galten, zu einer erhöhten Gefährdung in einer Kurve führen konnten. Weiter wurde herausgefunden, dass Unterschiede zwischen der Krümmungsrichtung und zwischen verschiedenen Kurvenabschnitten bestanden, was das potentielle Auftreten von ungünstigen Spur- und Unfalltypen betrifft. Z.B. können in Linkskurven generell in mehr Kurvenabschnitten mehr Spur- und Unfalltypen auftreten als in Rechtskurven.

Mit diesen Erkenntnissen konnte ein neuer Index, der die Gefährdung in einer Kurve beschreibt, entwickelt werden. Die Verteilung der Spurtypen, welche alleine zu wenig aussagekräftig war, konnte so in diesem Gefährdungsindex berücksichtigt werden.

Noch offen ist die Anwendung dieses Gefährdungsindex auf eine grössere Anzahl von Kurven. So könnten die in der Formel vorgeschlagenen Faktoren für eine höhere Gewichtung kalibriert werden.

9.2. Diskussion der Methodik und der Ergebnisse

Die Herangehensweise in dieser Arbeit war methodisch. Es wurde versucht, die zuvor gemachten Überlegungen mit Hilfe von empirischen Daten zu verifizieren.

Nach der Literaturrecherche, die bereits erste Hinweise auf mögliche Einflussfaktoren auf das Unfall- und Spurgeschehen ergeben hat, wurde mit der Fehlerbaumanalyse eine Systematisierung von Ursachen und Wirkungen erreicht. Einerseits konnten dadurch Einflussfaktoren auf das Unfallgeschehen gewonnen werden, andererseits zeigte die Fehlerbaumanalyse auch auf, wo noch weitere Zusammenhänge gesucht werden mussten. Es konnte weder eine eindeutige Zuordnung der Einflussfaktoren auf Unfall- und Spurtypen noch eine Zuordnung der Unfall- und Spurtypen zu bestimmten Abschnitten der Kurve gemacht werden. So wurde ein Gefährdungsindex I entwickelt, der die theoretischen Überlegungen zusammenfasste. Mit Hilfe der empirischen Daten wurden die relevanten Einflussfaktoren auf Unfall- und Spurtypen bestimmt. Diese Resultate flossen dann wiederum in den oben erwähnten Gefährdungsindex ein.

Der Ansatz hat sich als geeignet erwiesen, die Validierung der Daten wurde probiert, ist aber nicht vollumfänglich gelungen. Die Messungen haben dazu beigetragen, aus den Einflussfaktoren aus der Fehlerbaumanalyse diejenigen zu finden, welche einen signifikanten Einfluss auf das Unfall- und Spurge-schehen haben. Allerdings ist es nicht gelungen, Unfall- und Spurdaten aus den gleichen Kurven zu verwenden, und es musste auf Spurmessungen aus früheren Forschungsaufträgen zurückgegriffen werden.

Da aber angenommen werden kann, dass das Kollektiv der Fahrzeuglenkenden je Kurve gleiche Eigenschaften aufweist und die Unfälle nie zum Zeitpunkt der Messung auftraten und somit nicht aus der Stichprobe der Spurdaten stammen, kann davon ausgegangen werden, dass die Aussagen zu den Daten aufgrund des Stichprobenumfangs - und nicht der Qualität der verwendeten Daten - nicht wie gewünscht gelungen sind.

Eine Möglichkeit, weshalb nicht alle offenen Fragen beantwortet werden konnten, ist eine zu geringe Datenlage. Einerseits sind Schweizer Strassen relativ sicher, d.h. es gibt statistisch gesehen wenige Unfallereignisse. Andererseits wurden die Spurdaten mit einem speziell für die verwendeten Messpfosten erstellten Programm ausgewertet. Die Schwierigkeit bestand dort in der unkonstanten Fahrzeugerkennung und ungenauen Aufzeichnungen der Daten. Konkret wurden Fahrzeuglängen und Geschwindigkeiten nicht richtig erfasst und die Werte für den seitlichen Abstand des Fahrzeuges zum Strassenrand waren oftmals unrealistisch. Um diese Mängel etwas zu kompensieren, wäre eine um ein Vielfaches grössere Stichprobe an Messdaten erforderlich. Neben der Datenerfassung erwies sich die Software zur Auswertung der Spurdaten ebenfalls als wenig tauglich. Sie läuft bisher nur unter Windows 98, und es zeigte sich, dass das Programm mit den heutigen Systemen technisch nicht mehr kompatibel ist, eine Verbindung mit dem Internet oder Systemupdates sind z.B. nicht möglich.

Für weitere Arbeiten wäre es interessant zu verfolgen, welche Spurverläufe sich über einen längeren Zeitraum als nur ein paar Stunden ergeben würden. Mit den heutigen technischen Möglichkeiten wäre sicher eine andere Datenerfassung und -verarbeitung möglich. Es würde sich lohnen, einerseits das Programm zur Auswertung der Spuren sowie andererseits die Hardware der Messpfosten dem heutigen Stand der Technik anzupassen. So könnten Daten kontinuierlich erfasst und automatisch übertragen werden.

Die Unfalldaten aus den Unfallaufnahmeprotokollen der Polizei sind nicht unbedingt für weitere Forschung, wie sie hier gemacht wurde, geeignet. Für zukünftige Forschungsarbeiten sollte die Polizei direkt involviert sein und bei der Unfallaufnahme speziell auf eine sorgfältige Erfassung der forschungsrelevanten Daten achten. Weiter sollte die Möglichkeit bestehen, vorgängig die für die Bearbeitung einer bestimmten Aufgabenstellung notwendigerweise zu erfassenden Daten zu definieren. Es wäre vor allem interessant, die Spur des Unfallfahrzeuges in Bezug zum Kurvenort genauer zu kennen, z.B. mittels digitaler Erfassung von gis-Daten und Unfallskizzen auf vermassten Plänen. Weiter wäre wünschenswert, wenn die Unfalltypen detaillierter beschrieben werden könnten. Heute sagt ein Unfalltyp nichts über die Spur und Endlage eines Fahrzeuges aus.

Eine weitere - zu Beginn der Arbeit nicht ersichtliche Schwierigkeit – bestand in der Zugänglichkeit zu Unfalldaten aus Gründen des Datenschutzes. Selbst für wissenschaftliche Zwecke sind die Daten nicht in dem Umfang zugänglich, wie sie für gewisse Auswertungen notwendig wären.

In der Unfallprävention könnte das Spurverhalten einen ergänzenden Beitrag zu den heute bestehenden Unfallanalysen leisten. Die heute vorliegenden Resultate genügen nicht, um mit dem Spurverhalten alleine eine potentiell gefährliche Kurve zu definieren. Im Zusammenhang mit den Unfalldaten könnte es aber helfen, präventiv, durch die Betrachtung der Häufung von ungünstigen Spurtypen „Schneiden“, „Korrigieren“, „Ausholen“ und „Hinaustragen“, gefährliche Kurven zu entdecken.

Dennoch besteht ein grosses Potential, um mit qualitativ besseren und grösseren Datenmengen das Spurverhalten weiter zu erforschen. Neuere und bessere Technologien mit automatischer Datenübertragung könnten helfen, dieses Potential zu nutzen.

Es hat sich gezeigt, dass die Faktoren offene Sichtweite, schmale Fahrbahn und gestreckte Streckenführung sowohl bei den Unfalltypen als auch bei den Spurtypen einen ungünstigen Einfluss haben können. Allerdings können weiterhin keine eindeutigen Zuordnungen aller Faktoren der Unfalltypen zu den Spurtypen gemacht werden.

Aufgrund der oben erwähnten fehlenden eindeutigen Zuordnungen wurde ein neuer Ansatz gesucht, um die Beurteilung von ungünstigen Einflüssen zu

vertiefen. Die Erarbeitung eines neuen Indexes zur Beurteilung der Gefährlichkeit einer Kurve könnte eine mögliche Lösung sein, die fehlende uneindeutige Zuordnung von Unfall- und Spurtypen zu kompensieren. Mit der Gewichtung von einzelnen Einflussfaktoren sowie der Unfall- und Spurtypen kann zumindest eine Beurteilung des Gefährlichkeitsniveaus einer Kurve im Vergleich mit anderen Kurven oder einer Referenzstrecke angestrebt werden.

Dieser neue Index ermöglicht die Kombination verschiedener ungünstiger Einflüsse. Er berücksichtigt nicht nur Unfall- und Spurdaten, sondern erlaubt es, den einzelnen ungünstigen Einflussfaktoren wie z.B. „Kurve nach einem längeren gestreckten Strassenabschnitt“, eine höhere Gewichtung zu geben. Dieser Ansatz ist neu und muss in den nächsten Schritten mit mehr Daten vertieft werden.

9.3. Praktische Empfehlungen

Für eine unmittelbare und breite Anwendung in der Praxis ist die in dieser Arbeit beschriebene Methode des Gefährdungsindex noch zu wenig ausgereift, und die Möglichkeiten der Spurtypenerfassung sind noch ungenügend. Vor allem bezüglich Genauigkeit der Spurtypenzuordnung, der erfassbaren Datenmenge über einen längeren Zeitraum und der Auswertungsmöglichkeiten des heutigen Spurprogrammes ist sicherlich noch grosses Verbesserungspotential vorhanden. Mit einer verbesserten Erfassungsmöglichkeit und einer Auswertesoftware, die den heutigen Anforderungen angepasst ist, liessen sich die hier gefundenen Resultate noch weiter vertiefen.

Für den Einsatz der Resultate zu Präventionszwecken müsste, mit Blick auf die Praxis, abgeklärt werden, inwiefern z.B. der Gefährdungsindex in die heute verwendeten Infrastruktur-Sicherheitsinstrumente des Bundes eingebunden werden könnte. Das Ziel des Bundes, die Zahl der Unfälle noch weiter zu reduzieren, wird mit sinkender Anzahl der Unfälle immer aufwändiger und schwieriger. Die offensichtlichen Mängel an Infrastruktur und Fahrverhalten werden weniger. Neue Ansätze, wie der hier gefundene, könnten helfen, das anspruchsvolle Ziel zu erreichen.

Eine direkte Umsetzbarkeit der Resultate in die heute bestehenden Projektierungsnormen ist nicht gegeben. Diese Normen stützen sich v.a. auf fahrdynamische Grundsätze. Aspekte der Wahrnehmung oder ungünstige Kombinationen von eigentlich normgerechten Parametern werden nicht beachtet. Mit ausführlicheren Resultaten könnten diese Aspekte möglicherweise in zukünftige Normen einfließen.

9.4. Weiterer Forschungsbedarf

Um das Spurverhalten effizient und zuverlässig erfassen und in der Prävention erfolgreich einsetzen zu können, müssten zuerst neue Messgeräte entwickelt und erprobt werden. Mit Messkampagnen über längere Zeiträume hinweg und zudem zuverlässigeren Spurdaten könnten die hier gefundenen Resultate nochmals überprüft und erweitert werden.

Der in der vorliegenden Arbeit verfolgte methodische Ansatz könnte dazu dienen, in Zukunft eine grössere Datenmenge weiter zu validieren und die Methode der Spurtypenanalyse zu Präventionszwecken zu vertiefen.

Ein weiterer, spannender Ansatz wäre sicher auch, die Erfassung der Spurtypen mit der Eye-Tracking-Methode⁵⁶ aus der Wahrnehmungspsychologie zu ergänzen. Durch die Eye-Tracking-Methode könnte untersucht werden, ob sich das Blickverhalten von Personen in unterschiedlichen Kurven, die sich zuvor z.B. als unterschiedlich unfallträchtig erwiesen haben oder die einen unterschiedlichen Gefährdungsindex I aufweisen, in bestimmten Punkten unterscheidet.

Wie die Literaturrecherche gezeigt hat, bestehen in der Verbindung von Verkehrstechnik/Sicherheitsforschung und Wahrnehmungspsychologie noch Forschungslücken.

In der Literaturrecherche wurde in Kapitel 2.3 auf das Wahrnehmungsverhalten der Fahrzeuglenker eingegangen. Es konnte festgestellt werden, dass die physischen und psychischen Eigenschaften einer Person einen nicht unwesentlichen Einfluss auf ihr Fahrverhalten haben. Beispielsweise zeigte

⁵⁶ Bei der Eye-Tracking-Methode werden die Blickbewegungen eines Probanden erfasst und mit der Videoaufzeichnung des Blickfeldes zusammengeführt. So kann beispielsweise analysiert werden, welche Punkte ein Lenker während einer Kurvenfahrt fixiert.

sich, dass ein Fahrer bei mehrmaligem Befahren eines Streckenabschnittes bei gleicher Geschwindigkeit das gleiche Blickverhalten aufweist (Höfner, Hoskovec 1973). In einer weiteren Forschungsarbeit könnte untersucht werden, ob das gleiche Blickverhalten auch immer das gleiche Spurverhalten zur Folge hat.

Bei Untersuchungen des Blickfeldes, dem Teil des Gesichtsfeldes, in dem scharfes Sehen durch Drehen der Augen möglich ist, konnte herausgefunden werden, dass das Blickfeld horizontal und vertikal je ca. 45° beträgt (Steyer 2004). Je grösser das vorhandene Blickfeld war, desto grösser war die durchschnittlich geschätzte subjektive Geschwindigkeit in Kurven (Osaka 1991). Die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Sichtweiten könnten in einer weiteren Untersuchung um das Blickfeld erweitert werden. Es könnte untersucht werden, was sich in einer Kurve innerhalb dieses Blickfeldes befindet und welchen Einfluss es auf das Spurverhalten hat.

Ein Fahrzeug kann mittels zweier verschiedener Strategien gesteuert werden. Erstens kann man aus den visuellen Informationen ein Mass für die bevorstehende Kurvenkrümmung ableiten. Der Blickwinkel α vergrössert sich, wenn sich die Blickdistanz vergrössert, es ergibt also eine bessere Strassenerkennung von einem weiter entfernten Punkt auf der Strasse. Die zweite Strategie des Lenkens betrifft die Spurhaltung. Wenn man den Strassenrand fixiert, kann man den seitlichen Abstand durch den Winkel zwischen der Blickrichtung und der Fahrtrichtung abschätzen. In diesem Fall verkleinert sich der Winkel α , wenn die Blickdistanz grösser wird (Land, Michael F., Horwood 1998).

Mit der oben erwähnten Eye-Tracking-Methode könnte untersucht werden, ob bestimmten Spurtypen eine der beiden Steuer-Strategien zugeordnet werden kann. Weiter könnte auch analysiert werden, ob die bisherigen Erkenntnisse zu Neulenkern und erfahrenen Lenkern einen Einfluss auf das Spurverhalten haben.

Die Erkenntnisse aus dem Wahrnehmungsverhalten der Fahrzeuglenker flossen in die Fehlerbaumanalyse ein, konnten aber mit den empirischen Daten nicht weiter untersucht werden, da weder zu den Unfall- noch zu den Spurdaten konkrete Angaben zu den Personen vorlagen.

Weiter müsste auch im Bereich der Datenerfassung durch die Polizei spezifischer auf die für die Forschung benötigten Angaben eingegangen werden, z.B. Erfassung von genaueren Aussagen der Unfallbeteiligten zur Unfallursache, ohne dass Datenschutzrichtlinien verletzt werden würden. Beispielsweise könnten die Bewegung und die Endlage des Unfallfahrzeuges digital und georeferenziert erfolgen.

Die ersten, in dieser Forschungsarbeit gefundenen Zusammenhänge könnten mit konkreten und durch grosse Datenmengen validierten Resultaten auch in praxistaugliche Präventionsmöglichkeiten umgewandelt werden.

In der heutigen Sicherheitsarbeit werden z.B. bei Sicherheitsaudits⁵⁷ Ist-Zustände und Projekte aufgrund von Checklisten mit den Projektierungsnormen verglichen. Vorhandene Mängel werden dann nach ihrer Schwere beurteilt. Die Norm wird heute vielfach innerorts oder bei Knoten angewendet, einzelne Kurven ausserorts werden eher selten beurteilt. Die Normen betrachten ebenfalls keine Fahrspuren. Zudem wurden bis heute keine quantifizierten Kombinationen von Mängeln und daraus entstehenden Folgen betrachtet.

Konkret könnte der in der vorliegenden Arbeit erarbeitete Gefährdungsindex einer Kurve mit ausreichendem Datenmaterial weiter überprüft und verfeinert werden. Damit könnten eine Strecke oder ein gesamtes Netz auf eine mögliche Gefährdung hin überprüft werden, und es könnten viel mehr Faktoren in eine Beurteilung einfließen als dies heute allein aufgrund der Analyse der Unfalldaten möglich ist. Mit genügend Daten könnten Referenzkurven dargestellt und weitere Kurven so in einen Kontext eingeordnet werden.

⁵⁷ SN 641 722 Strassenverkehrssicherheit – Audit, VSS Zürich, 2013

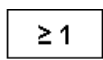
Anhänge

Abkürzungen

UAP	Unfallaufnahmeprotokoll
A	Klothoidenparameter
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BA	Bogenanfang
BE	Bogenende
BM	Bogenmitte
DTV	durchschnittlicher täglicher Verkehr [Fz/Tag]
ES	Erschliessungsstrasse
HLS	Hochleistungsstrasse
HVS	Hauptverkehrsstrasse
K	Krümmung
KU	Kurvigkeit [gon/km]
R	Radius der Kurve [m]
R _{max}	maximal gefahrener Radius in einer Kurve
R _{min}	Minimal gefahrener Radius in einer Kurve
SS	Sammelstrasse
ÜA	Übergangsbogenanfang
ÜE	Übergangsbogenende
V ₈₅	Geschwindigkeit der schnell fahrenden Fahrzeuge (nur 15% der Fz sind schneller unterwegs)
V _m	mittlere Geschwindigkeit
V _p	Projektierungsgeschwindigkeit
VS	Verbindungsstrasse
VUA	Verkehrstechnische Unfallanalyse

A Fehlerbäume

Legende:



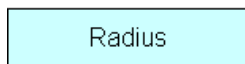
ODER-Verknüpfung, mindestens ein Ausfall ereignet sich



Übertragungsbildzeichen, der Fehlerbaum wird an anderer Stelle fortgesetzt

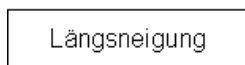


Einflussfaktor



Radius

Faktor ist relevant für Unfalltyp

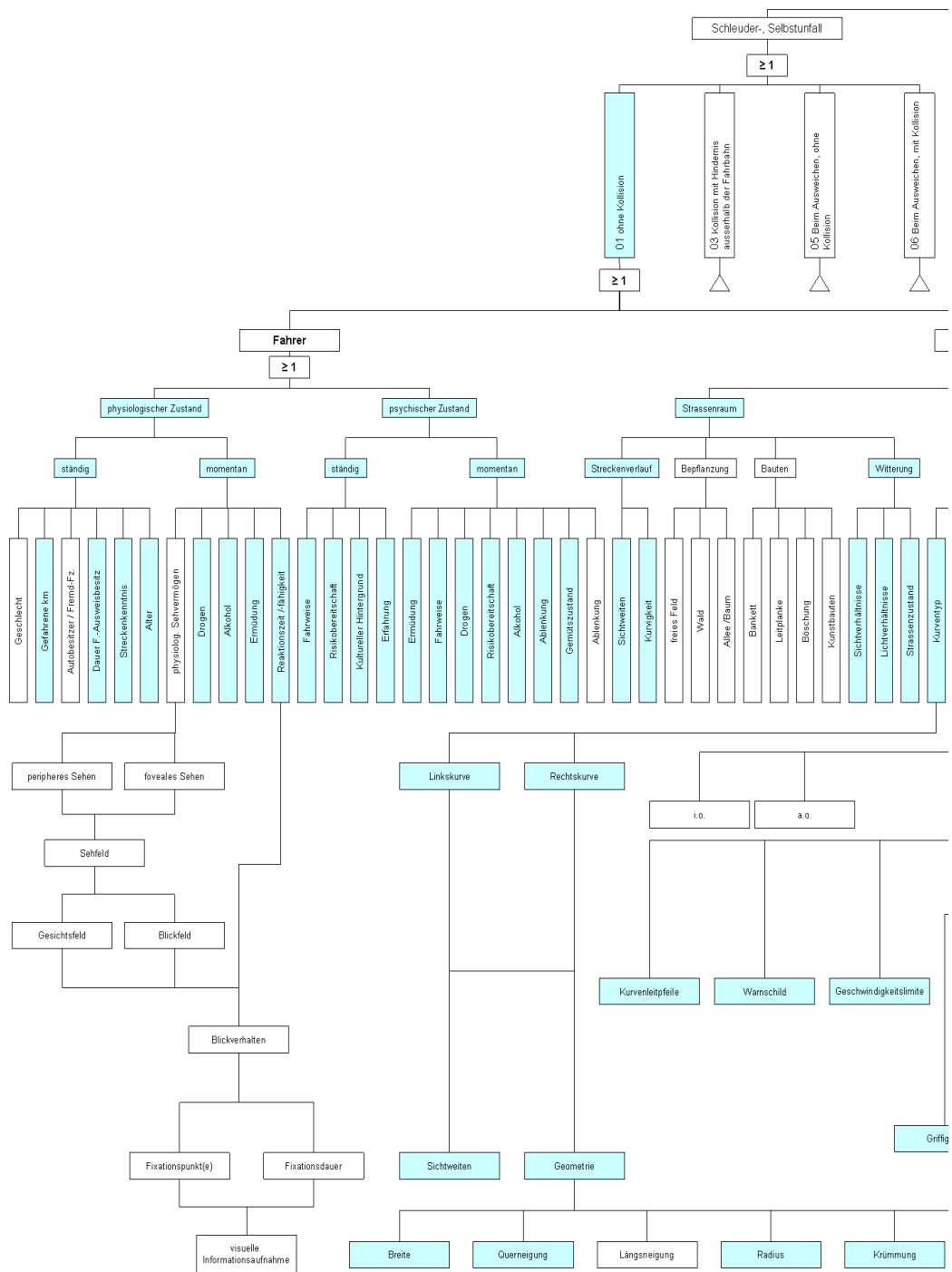


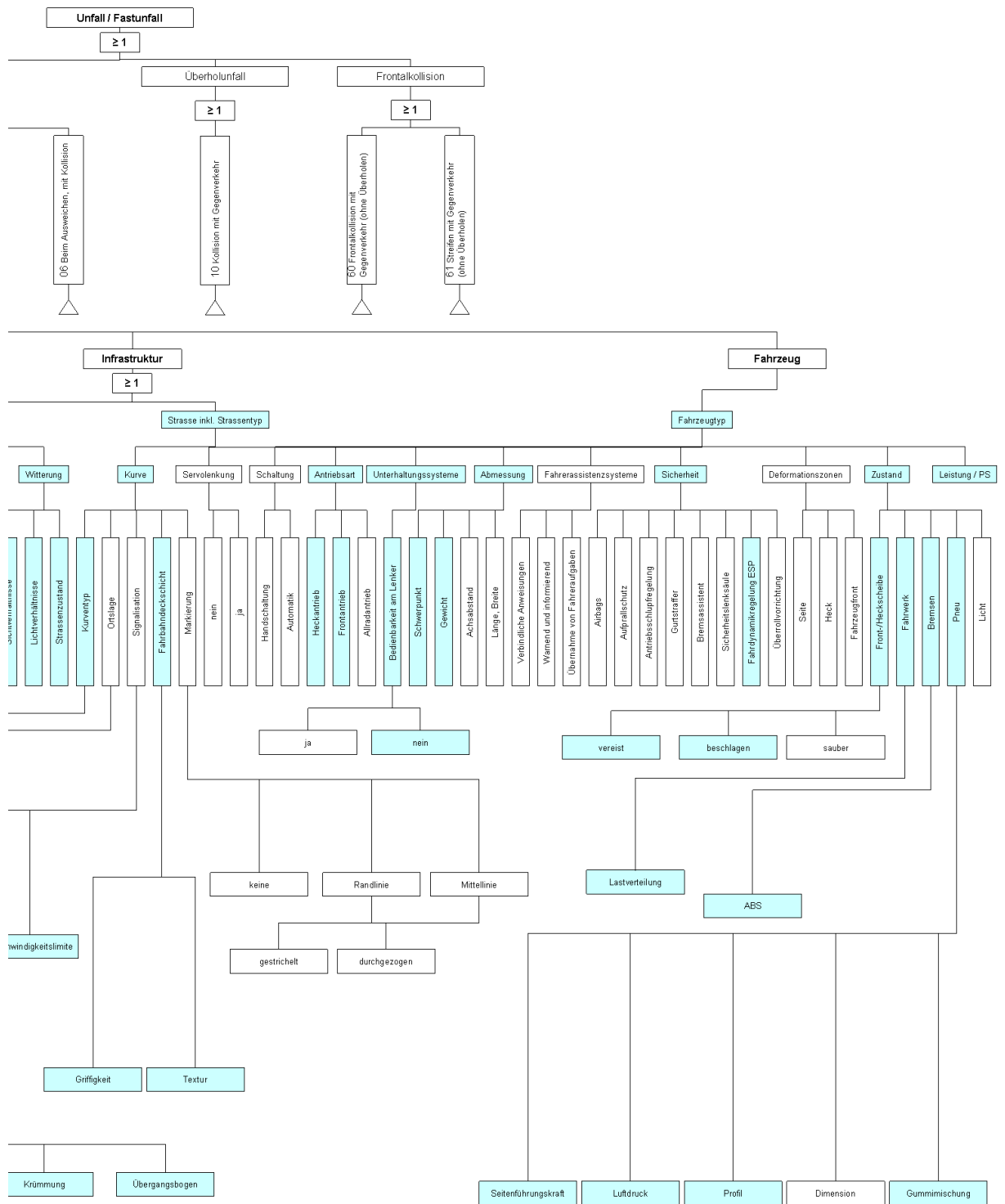
Längsneigung

Faktor ist nicht relevant für Unfalltyp

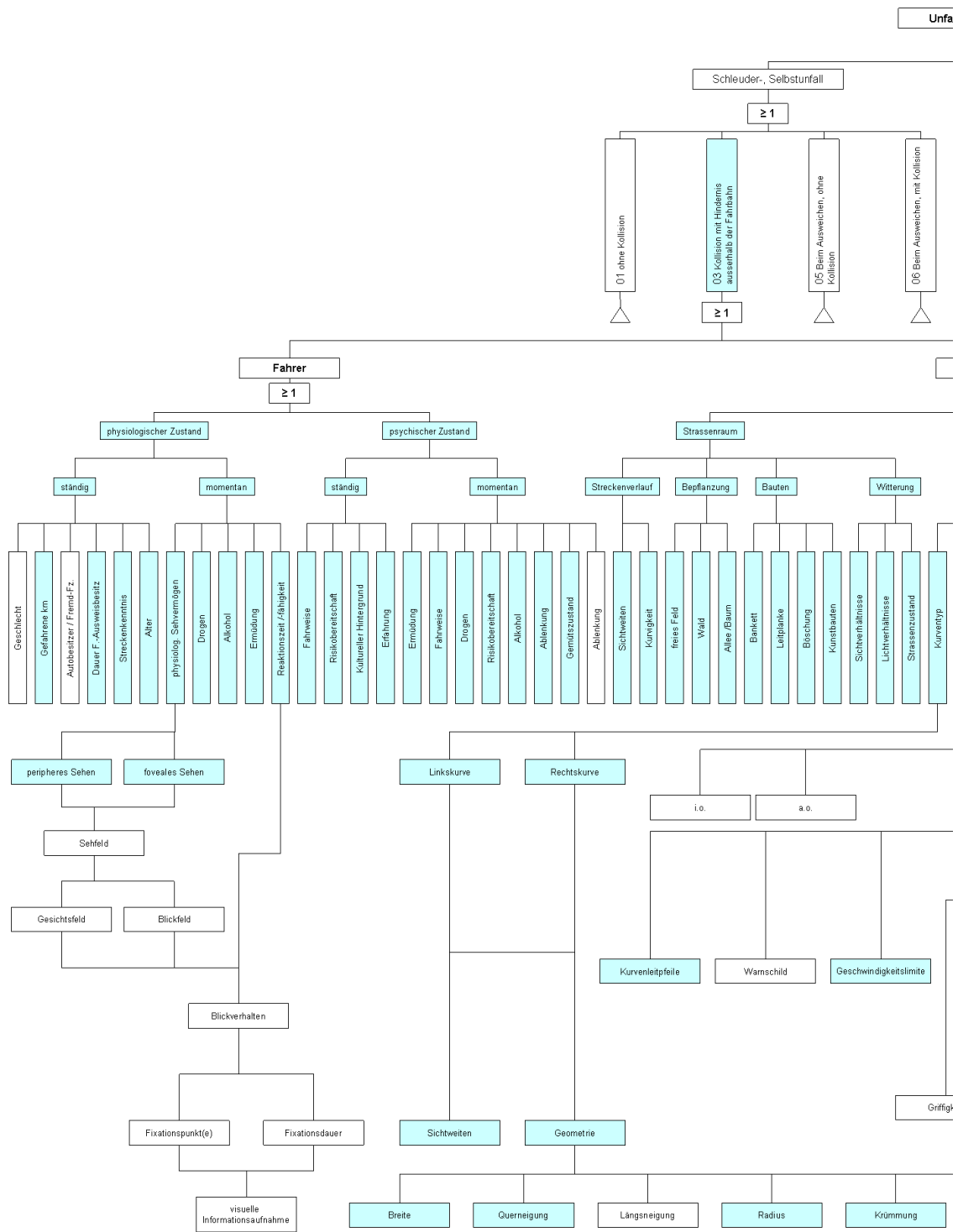
A.1 Fehlerbaum Unfalltyp 01

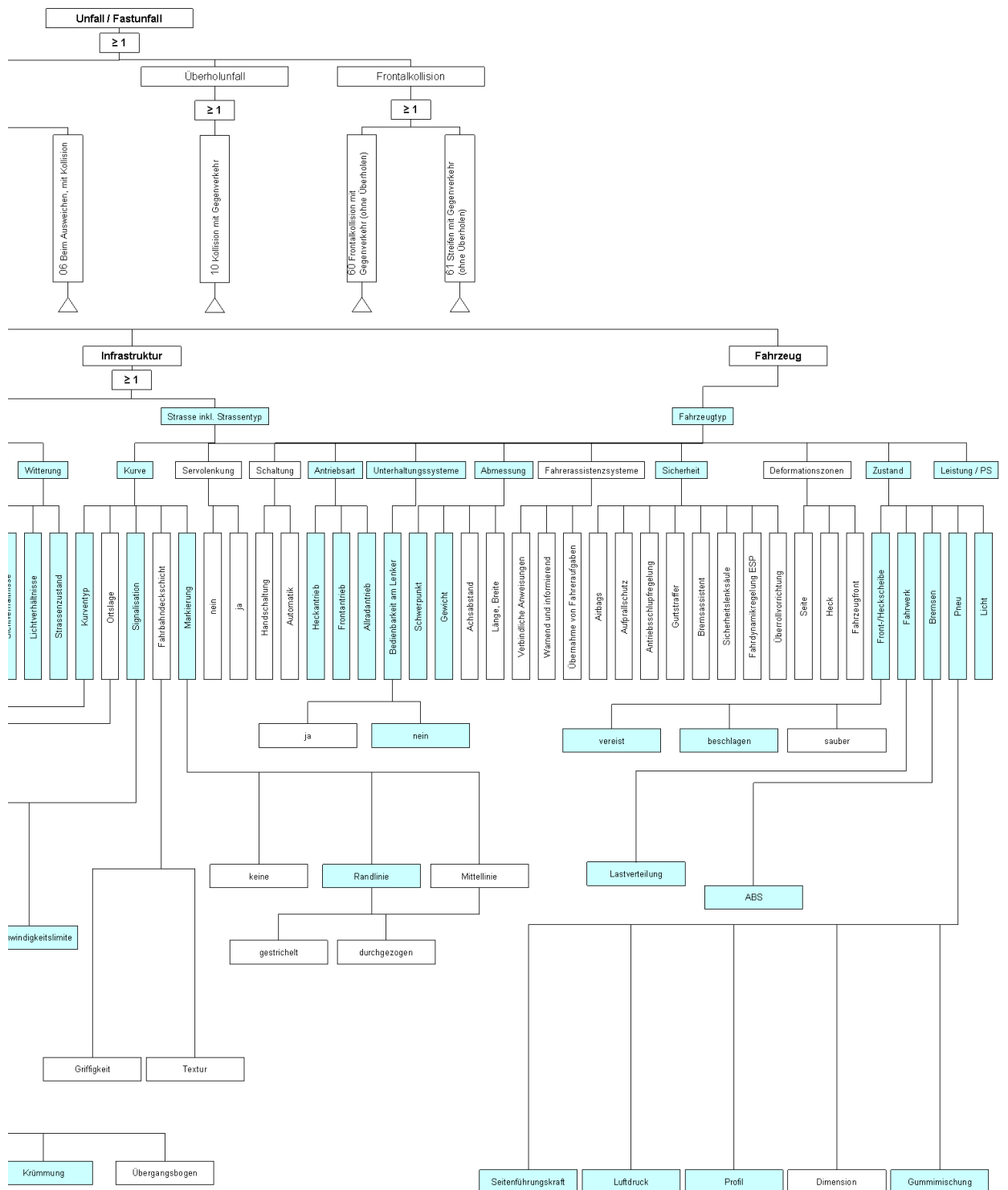
Unfr



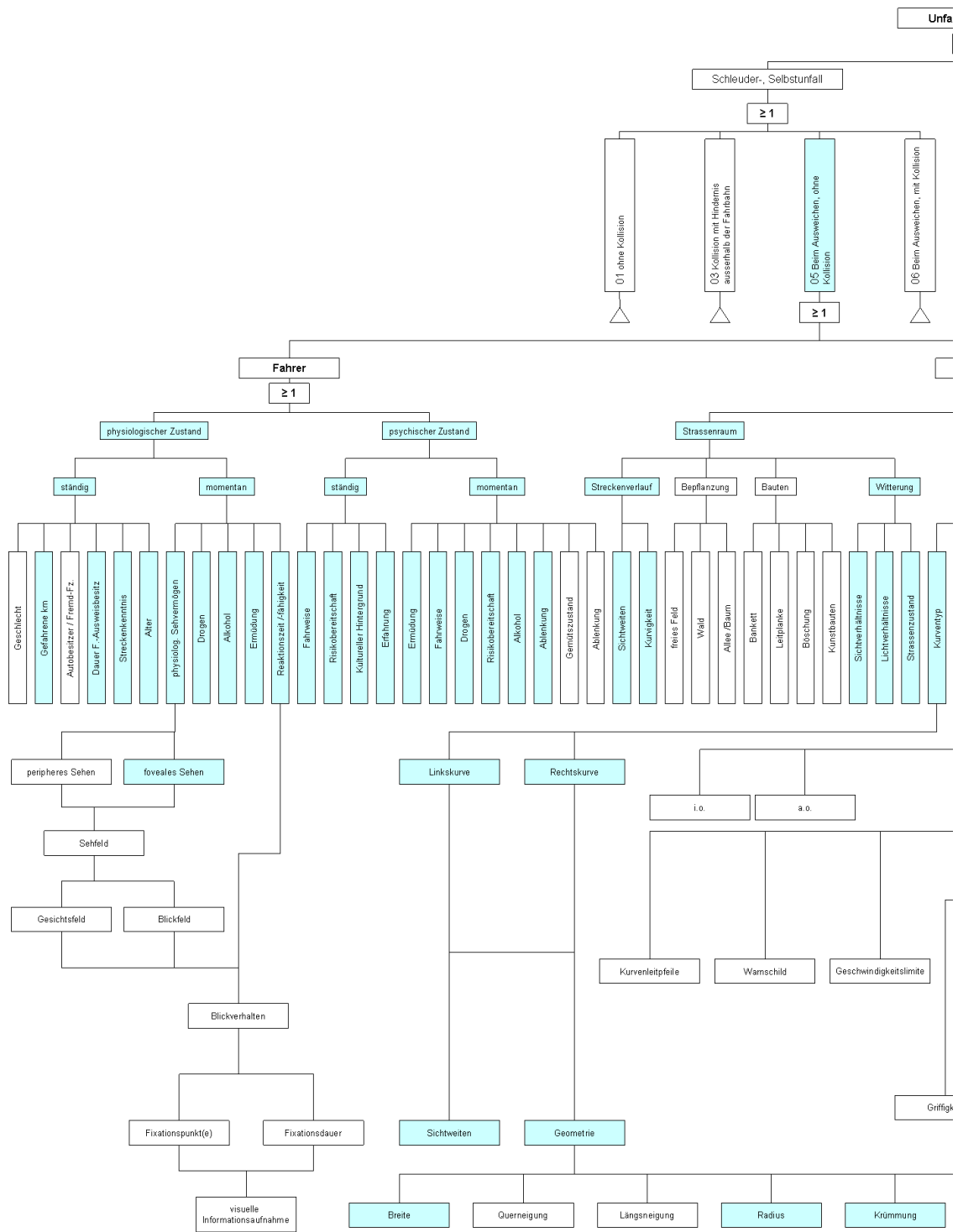


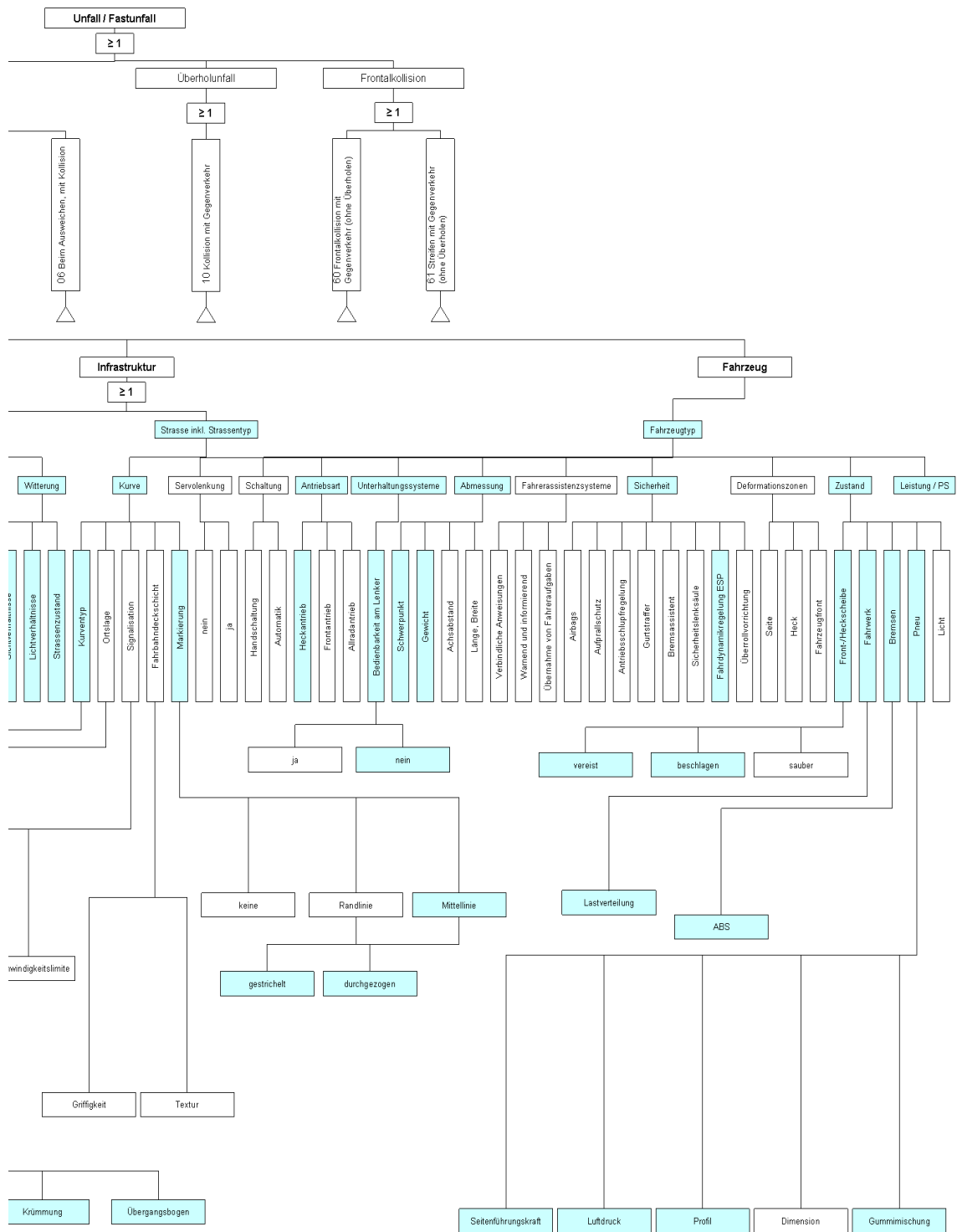
A.2 Fehlerbaum Unfalltyp 03



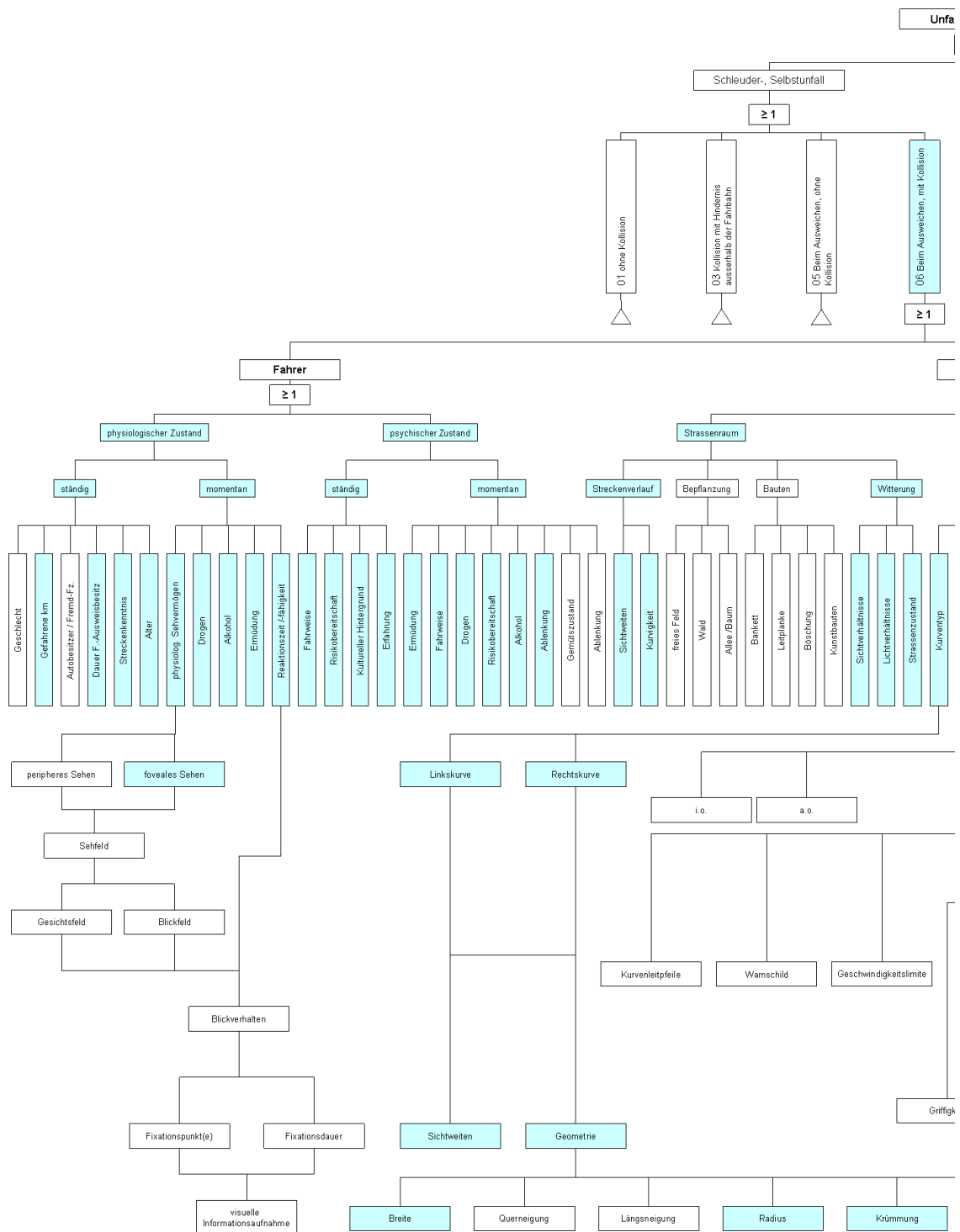


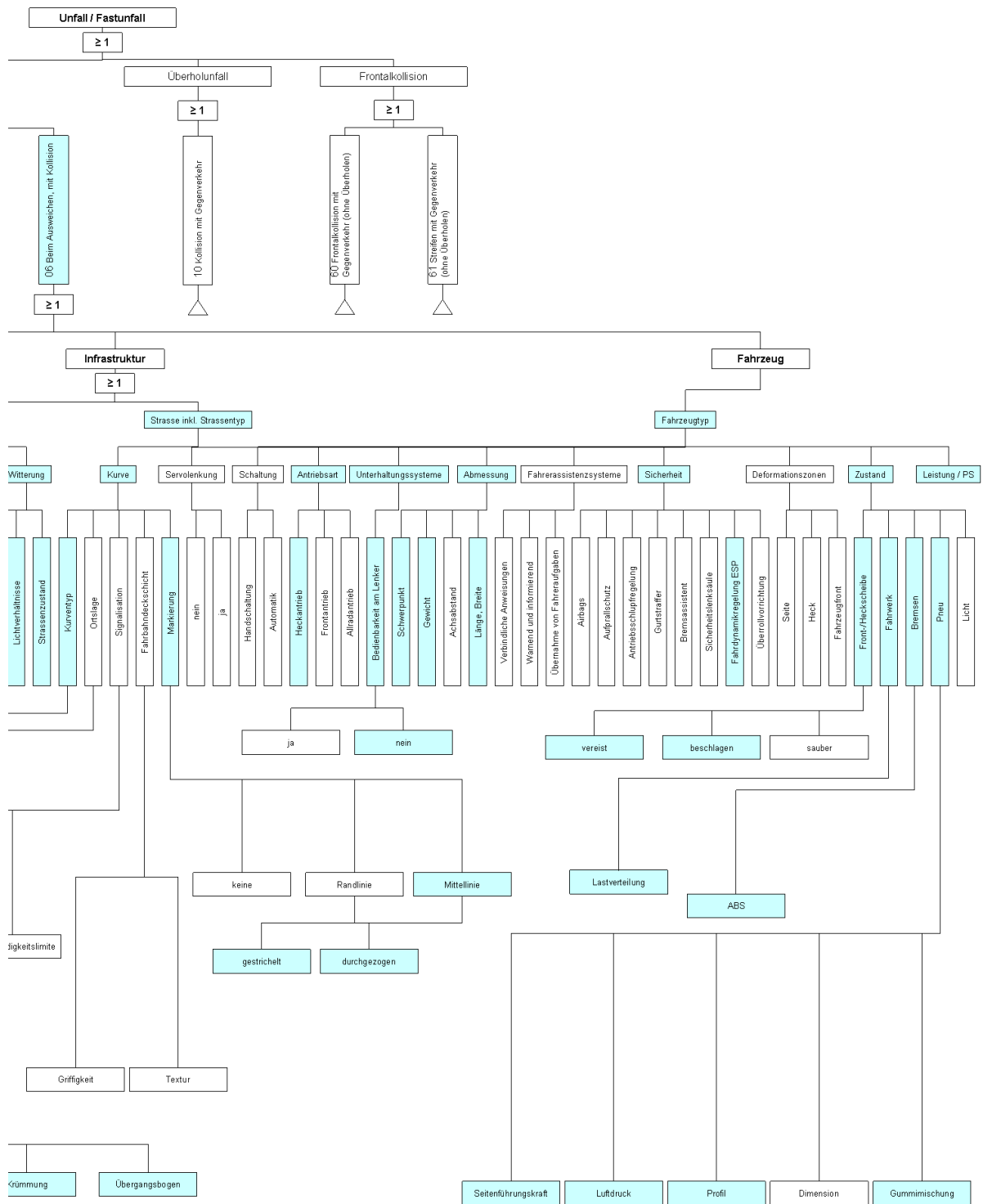
A.3 Fehlerbaum Unfalltyp 05



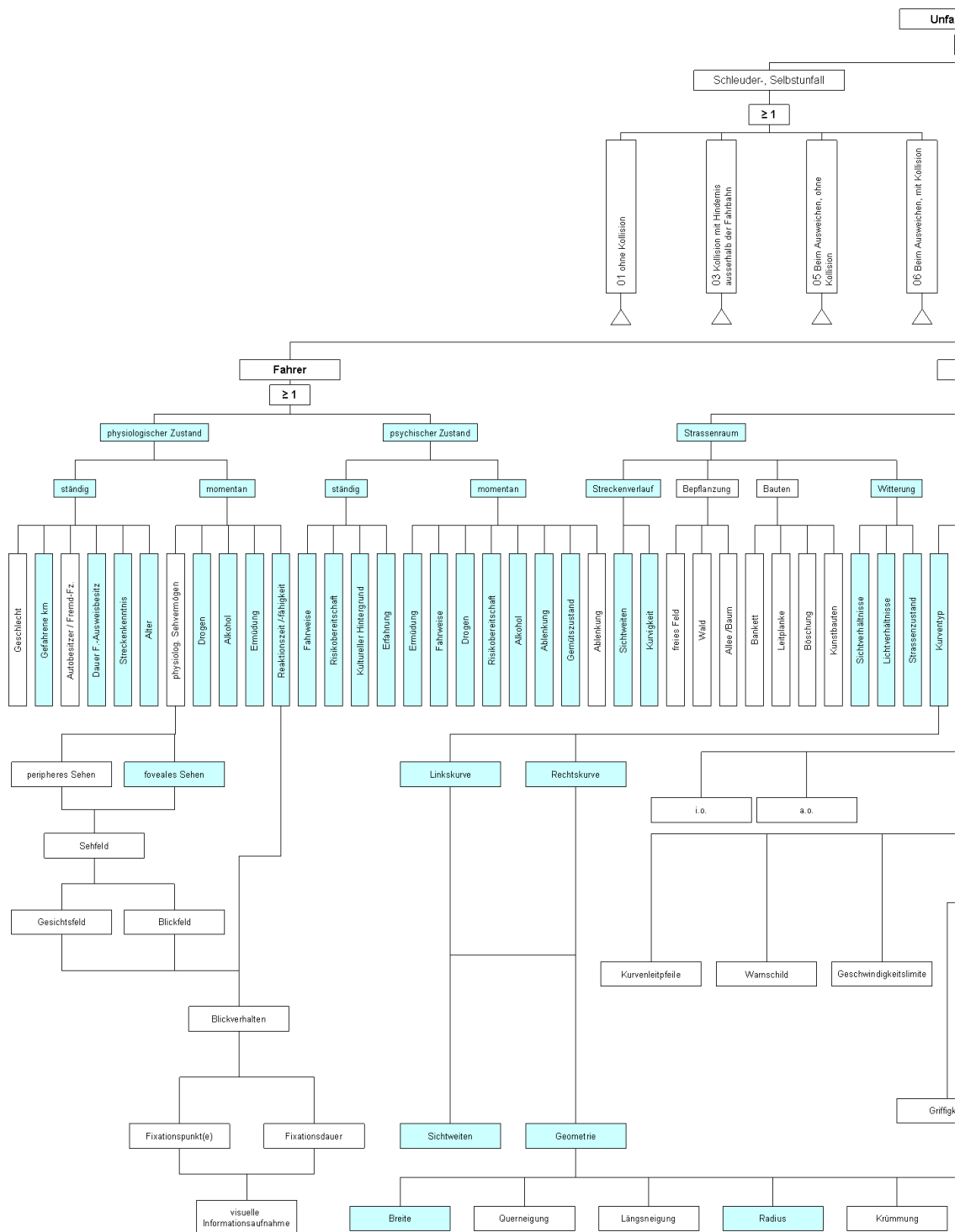


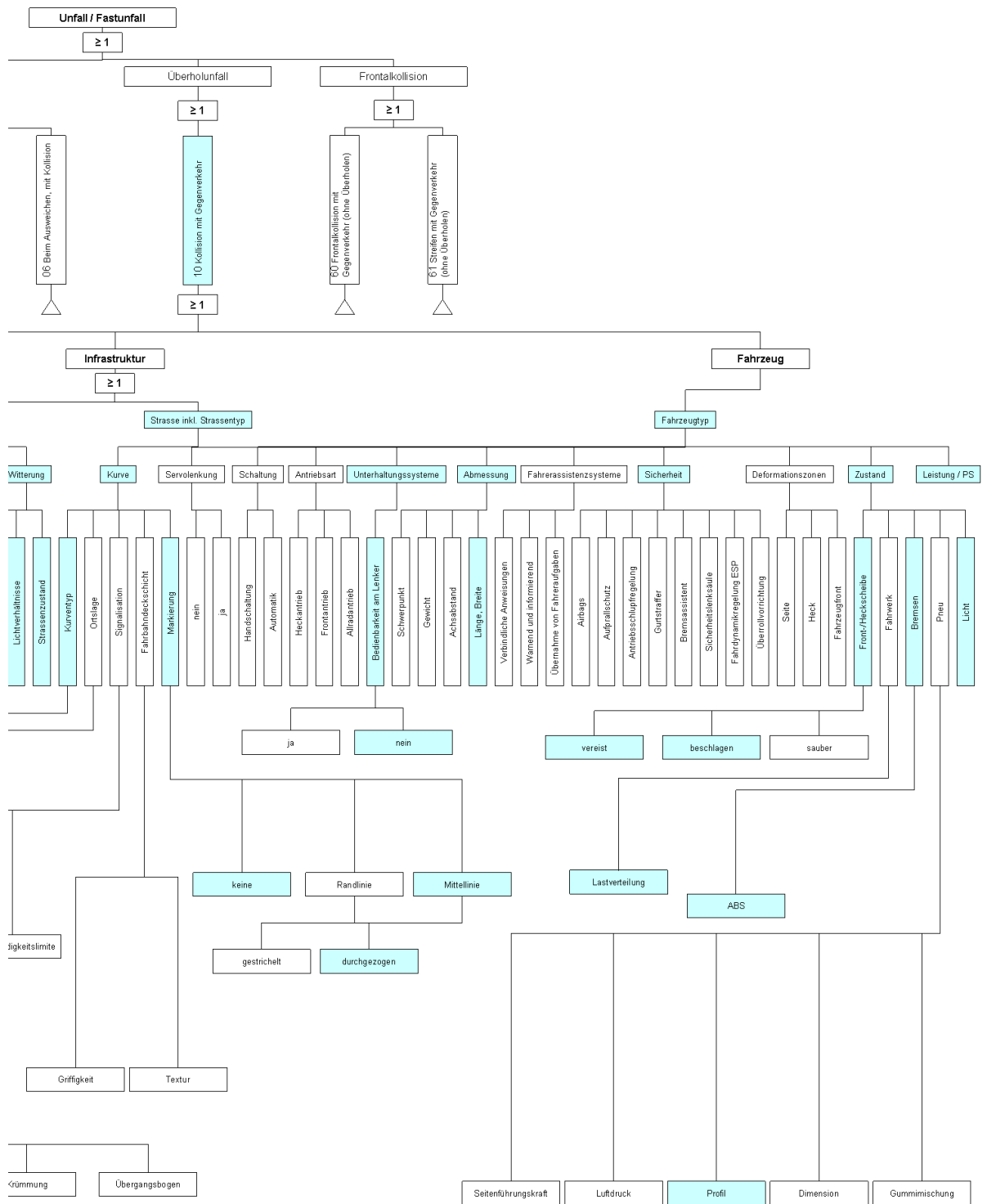
A.4 Fehlerbaum Unfalltyp 06



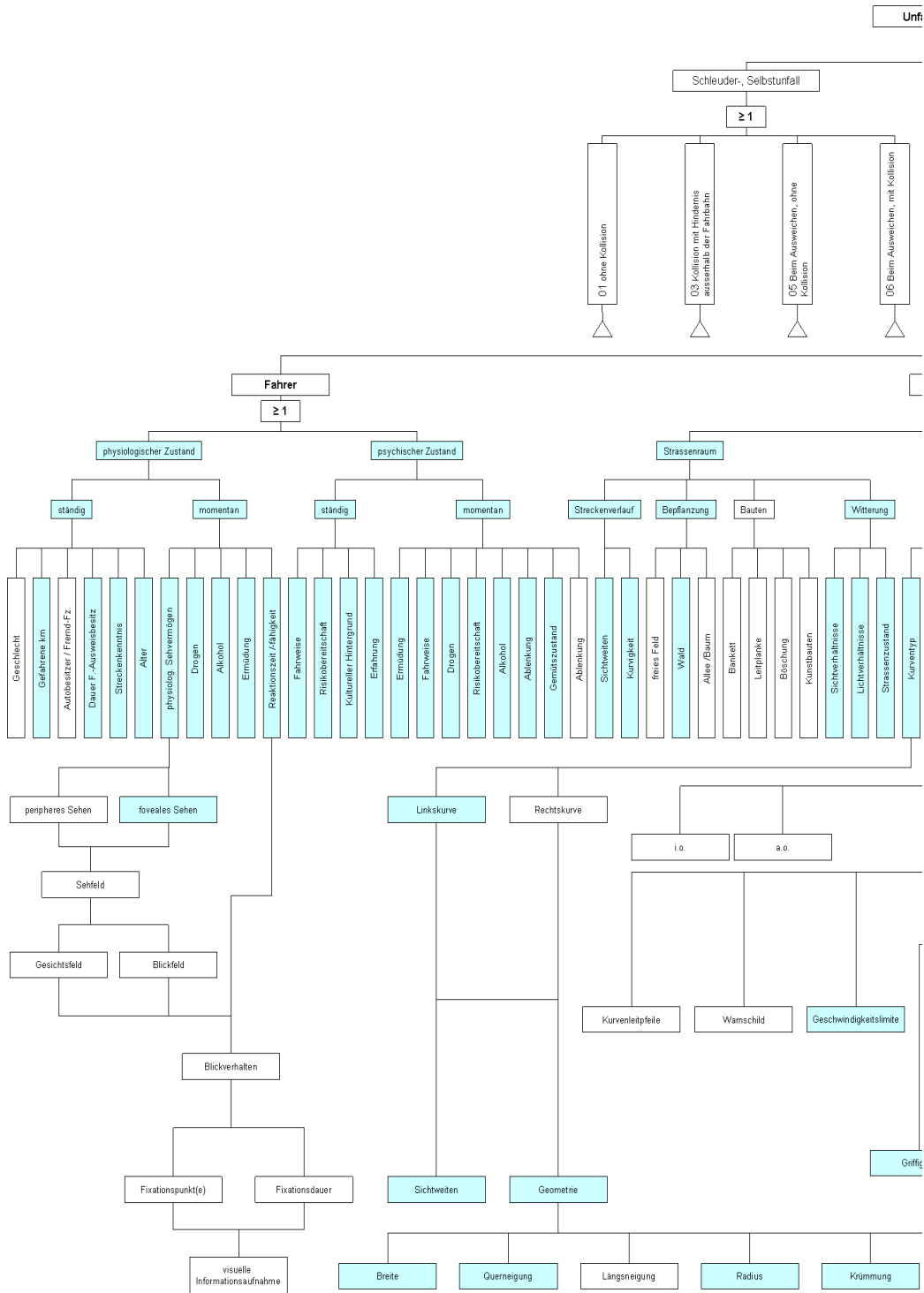


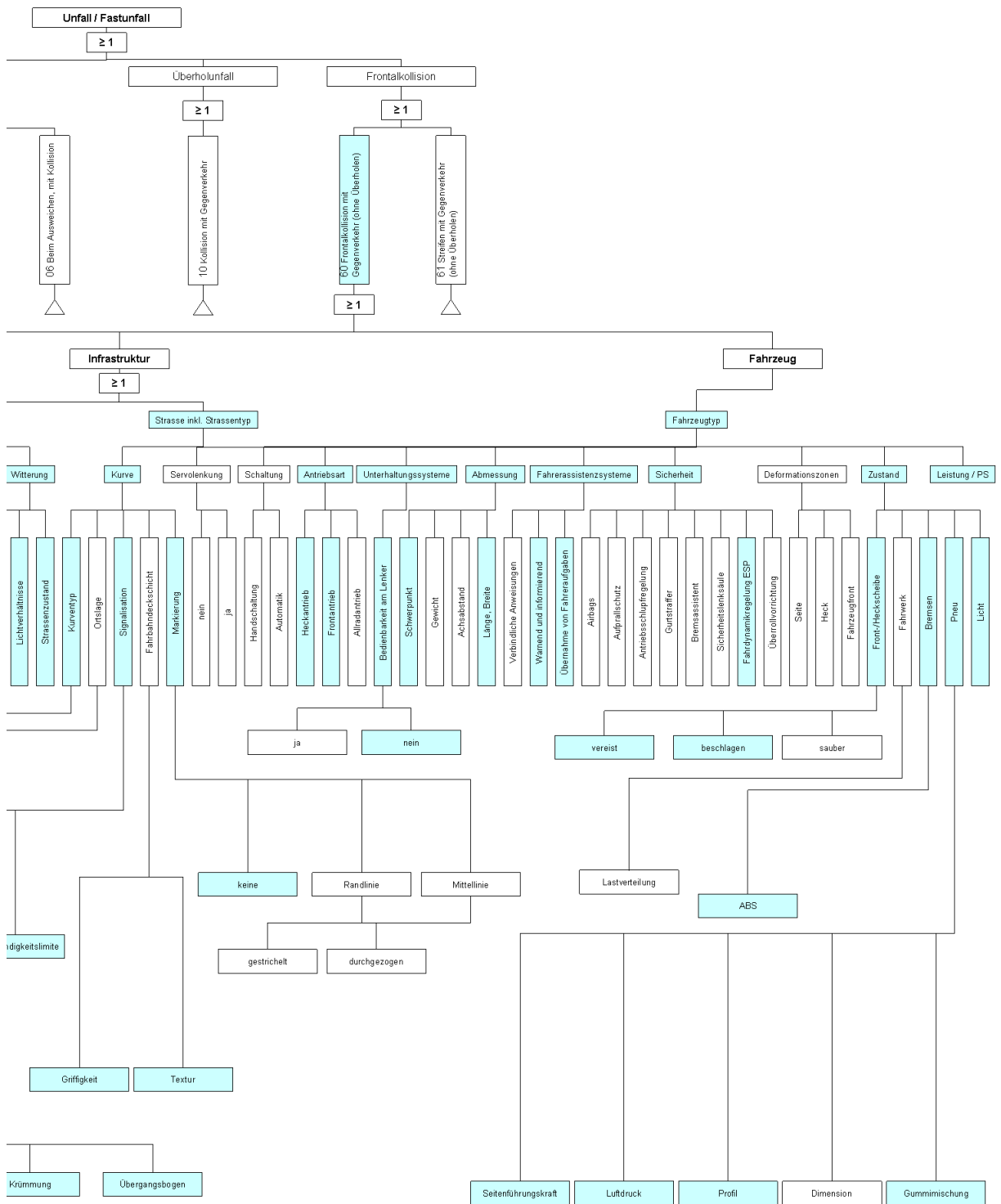
A.5 Fehlerbaum Unfalltyp 10



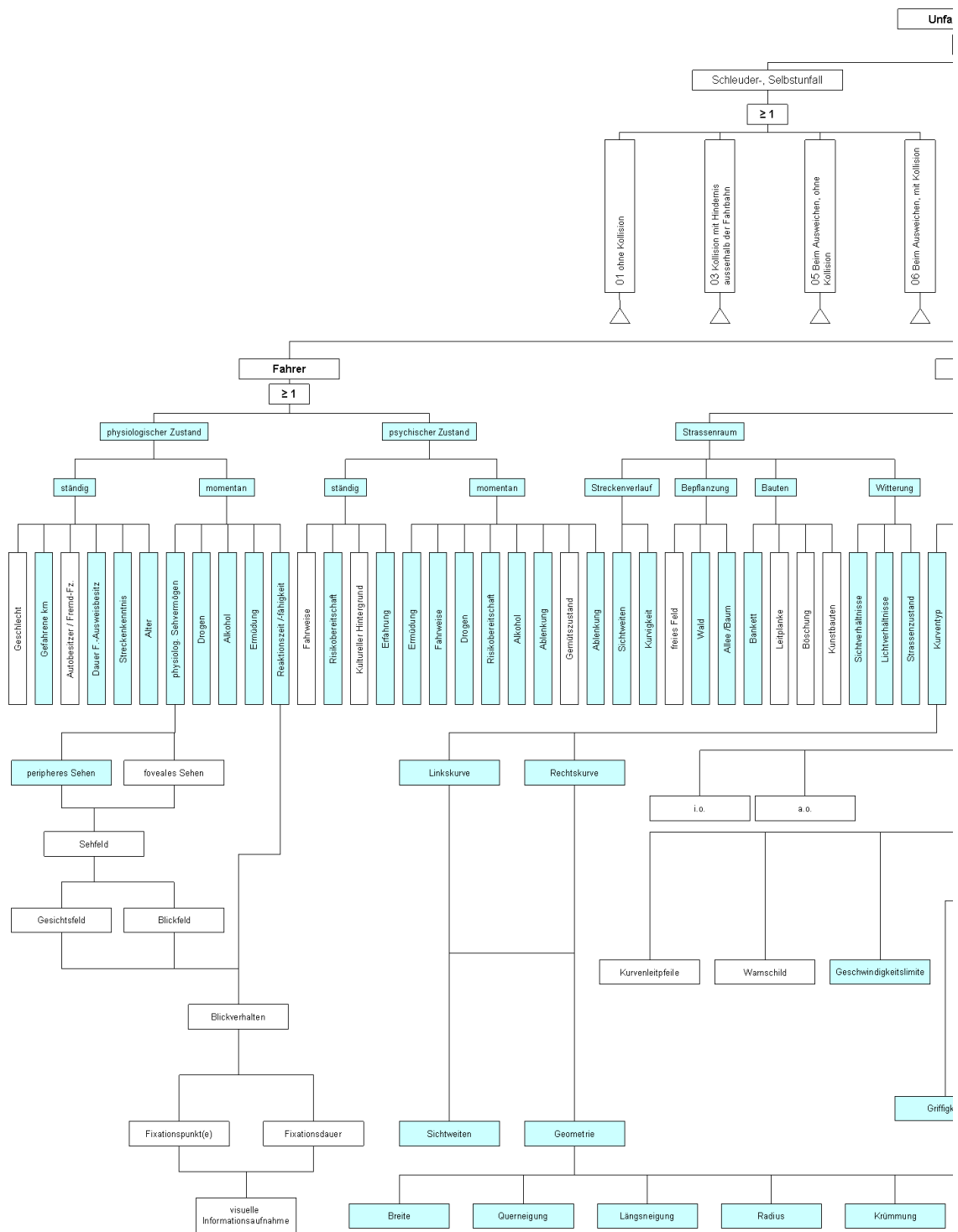


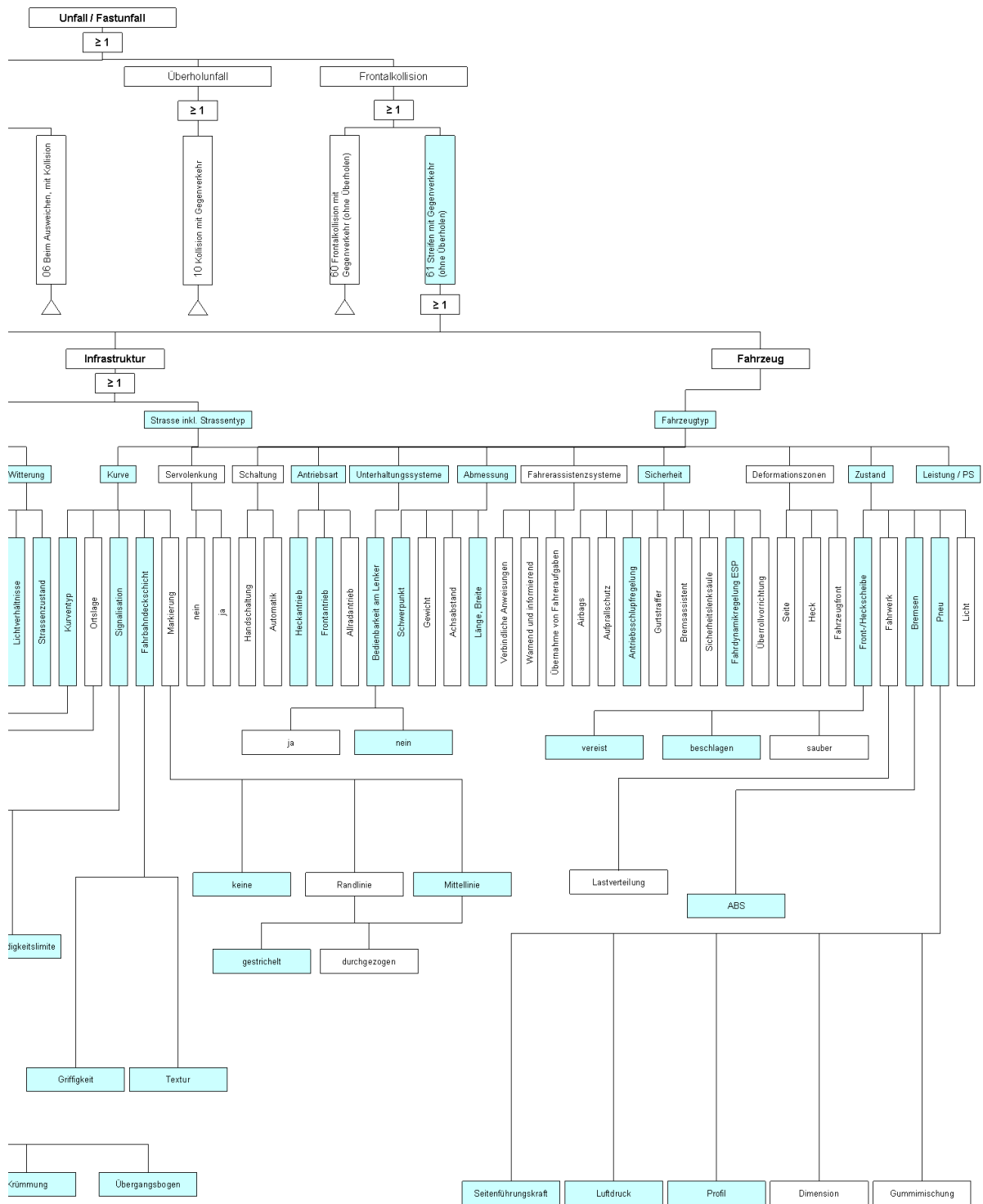
A.6 Fehlerbaum Unfalltyp 60





A.7 Fehlerbaum Unfalltyp 61





B Messkurven

B.1 Messkurven Übersicht

Tabelle B-1: Messkurven Übersicht

Ort	Kt.	Radius [m]	Krümmungsrichtung *	Anzahl Spuren
Hittnau - Pfäffikon	ZH	65	Linkskurve	183
Boppelsen - Buchs	ZH	65	Rechtskurve	101
Affoltern a. A. - Aeugstertal	ZH	70	Linkskurve	100
Reppischtal, Stallikon - Aumüli	ZH	79	Linkskurve	219
Affoltern a. A. - Aeugstertal	ZH	115	Rechtskurve	110
Aeugstertal - Türlen	ZH	143	Linkskurve	115
Effigen - Neu Stadel/Brugg	AG	150	Linkskurve	71
Sihltalstrasse	ZH	195	Linkskurve	448
Sihltalstrasse	ZH	200	Rechtskurve	147
Pfäffikon (ZH) - Hittnau	ZH	220	Rechtskurve	90
Total				1584

* bezüglich Hinverkehr

Quelle: (Spacek 1998)

B.2 Messkurven Detail (Teil 1/3)

Ort	Boppelsen - Buchs	Hittnau - Pfäffikon	Affoltern a. A. - Aeugstertal	Reppischtal, Stallikon - Aumüli
Kanton	ZH	ZH	ZH	ZH
Anzahl Spuren	101	183	100	219
Radius [m]	65	65	70	79
Krümmungsrichtung	Rechtskurve	Linkskurve	Linkskurve	Linkskurve
Winkeländerung	57.24	131.67	62.46	72.45
Übergangsbogen	ja	ja	nein	ja
Summe Länge	84.96	190.45	77.3	127.86
Länge der Zufahrtsgeraden	45*	130	180	30*
Breite der Zufahrtsgeraden	2.9	3.15	3.35	2.8
Breite in Bogenmitte	3.1	3.7	3.45	3.45
p Bogenmitte [%]	7.3	7.4	5.3	7.3
i (ca. +/- %) bzgl. Hinverkehr	-4	-4	4	0
Sicht nach innen	3	3	2	1
Sicherheitslinie durchgezogen	ja	nein	nein	ja
Randmarkierung	ja	ja	ja	ja
Mittellinie gestrichelt	nein	ja	ja	nein
Streckencharakteristik	gestreckt	gestreckt	kurvig	gestreckt
Kurvenlage	freies Feld	freies Feld	freies Feld	Wald
DTV	1000	5300	2200	1500
Höchstgeschwindigkeit	80	80	80	60
Geschwindigkeit-Signal	nicht sig.	nicht sig.	nicht sig.	signalisiert
Strassenanlage	Gefälle	Gefälle	Steigung	eben
Strassenbeleuchtung	keine	keine	keine	keine
Streckentyp	lokale VS	HVS	VS	HVS
delta Vm Zufahrt - Bogenanfang [km/h]	11.1	9.8	10.5	4.6
delta Vm Bogenanfang -Bogenmitte [km/h]	-0.9	2.5	0.7	-0.7
delta V85 Zufahrt - Bogenanfang [km/h]	13.5	13.5	12.1	5.2
delta V85 Bogenanfang -Bogenmitte [km/h]	-1.5	3.4	1.6	-2.2
Temperatur [°C]	20	20	20	20
Strassenzustand [-]	trocken	trocken	trocken	trocken
Witterung [-]	bedeckt	sonnig	bedeckt	bedeckt
Lichtverhältnisse [-]	Tag	Tag	Tag	Tag
Vm Zufahrt [km/h]	65.3	67.3	65.8	59.3
Vm Bogenanfang [km/h]	54.2	57.5	55.3	54.7
Vm Bogenmitte [km/h]	55.1	55	54.6	55.4
V85 Zufahrt [km/h]	74	77	74.7	65
V85 Bogenanfang [km/h]	60.5	63.5	62.6	59.8
V85 Bogenmitte [km/h]	62	60.1	61	62
Ideal [%]	0.0	0.6	1.0	0.5
Normal [%]	9.0	9.9	20.0	34.8
Korrigieren [%]	1.0	4.4	0.0	2.0
Schneiden [%]	28.0	34.3	48.0	31.4
Ausholen [%]	6.0	9.4	0.0	7.4
Hinaustr. [%]	5.0	1.7	5.0	0.5
Uebrige [%]	51.0	39.8	26.0	23.5

B.2 Messkurven Detail (Teil 2/3)

Ort	Affoltern a. A. - Aeugstertal	Aeugstertal - Türlen	Pfäffikon (ZH) - Hittnau
Kanton	ZH	ZH	ZH
Anzahl Spuren	110	115	90
Radius [m]	115	143.25	220
Krümmungsrichtung	Rechtskurve	Linkskurve	Rechtskurve
Winkeländerung	43.56	45.99	44.28
Übergangsbogen	ja	ja	ja
Summe Länge	103.5	179.66	220
Länge der Zufahrtsgeraden	100	400	650
Breite der Zufahrtsgeraden	3.4	2.75	3.6
Breite in Bogenmitte	3.4	2.9	3.43
p Bogenmitte [%]	6.3	6.4	6.4
i (ca. +/- %) bzgl. Hinverkehr	3	3	-3
Sicht nach innen	2	1	2
Sicherheitslinie durchgezogen	nein	nein	ja
Randmarkierung	ja	ja	ja
Mittellinie gestrichelt	nein	nein	nein
Streckencharakteristik	kurvig	gestreckt	gestreckt
Kurvenlage	freies Feld	Wald	freies Feld
DTV	2200	1500	5300
Höchstgeschwindigkeit	80	80	80
Geschwindigkeit-Signal	nicht sig.	nicht sig.	nicht sig.
Strassenanlage	eben	Steigung	Gefälle
Strassenbeleuchtung	keine	keine	keine
Streckentyp	VS	VS	HVS
delta Vm Zufahrt - Bogenanfang [km/h]	3.3	7.3	3.9
delta Vm Bogenanfang -Bogenmitte [km/h]	-1.5	-1	-0.4
delta V85 Zufahrt - Bogenanfang [km/h]	5.3	7.9	4.7
delta V85 Bogenanfang -Bogenmitte [km/h]	-1.4	-1	-0.7
Temperatur [°C]	20	20	20
Strassenzustand [-]	trocken	trocken	trocken
Witterung [-]	schön	schön	schön
Lichtverhältnisse [-]	Tag	Tag	Tag
Vm Zufahrt [km/h]	64.3	75	76.4
Vm Bogenanfang [km/h]	61	67.7	72.5
Vm Bogenmitte [km/h]	62.5	68.7	72.9
V85 Zufahrt [km/h]	72	84.9	86
V85 Bogenanfang [km/h]	66.7	77	81.3
V85 Bogenmitte [km/h]	68.1	78	82
Ideal [%]	0.9	0.0	1.1
Normal [%]	48.2	7.0	33.3
Korrigieren [%]	2.7	2.6	0.0
Schneiden [%]	8.2	18.3	12.2
Ausholen [%]	6.4	4.3	0.0
Hinaustr. [%]	2.7	7.8	3.3
Uebrige [%]	30.9	60.0	50.0

B.2 Messkurven Detail (Teil 3/3)

Ort	Effigen - Neu Stadel/Brugg	Sihltalstrasse	Sihltalstrasse	Sihltalstrasse
Kanton	AG	ZH	ZH	ZH
Anzahl Spuren	71	385	64	147
Radius [m]	150	195	195	200
Krümmungsrichtung	Linkskurve	Linkskurve	Rechtskurve	Rechtskurve
Winkeländerung	33.12	59.4	59.4	69.57
Übergangsbogen	ja	ja	ja	ja
Summe Länge	138	249.5	249.5	318
Länge der Zufahrtsgeraden	175	300	300	500
Breite der Zufahrtsgeraden	3.4	3.3**	3.3**	3.15**
Breite in Bogenmitte	3.45	3.35**	3.35**	3.4**
p Bogenmitte [%]	6.5	6	6	5
i (ca. +/- %) bzgl. Hinverkehr	2	1.5	-1.5	-1.5
Sicht nach innen	3	3	3	3
Sicherheitslinie durchgezogen	nein	ja	ja	ja
Randmarkierung	ja	ja	ja	ja
Mittellinie gestrichelt	ja	ja	ja	nein
Streckencharakteristik	gestreckt	kurvig	kurvig	kurvig
Kurvenlage	freies Feld	einseit. Vegetation	einseit. Vegetation	Wald
DTV	3100	6100	6100	6100
Höchstgeschwindigkeit	80	80	80	80
Geschwindigkeit-Signal	nicht sig.	nicht sig.	nicht sig.	nicht sig.
Strassenanlage	Steigung	Steigung	Gefälle	Gefälle
Strassenbeleuchtung	keine	durchgehend	durchgehend	durchgehend
Streckentyp	HVS	HVS	HVS	HVS
delta Vm Zufahrt - Bogenanfang [km/h]	1.9	k.a.	k.a.	2.4
delta Vm Bogenanfang -Bogenmitte [km/h]	0.1	0.8	k.a.	0.1
delta V85 Zufahrt - Bogenanfang [km/h]	1.7	k.a.	k.a.	2
delta V85 Bogenanfang -Bogenmitte [km/h]	-0.8	1.4	k.a.	1.1
Temperatur [°C]	20	20	20	20
Strassenzustand [-]	trocken	trocken	trocken	trocken
Witterung [-]	schön	schön	schön	schön
Lichtverhältnisse [-]	Tag	Tag	Tag	Tag
Vm Zufahrt [km/h]	79.1	k.M.	k.M.	76.2
Vm Bogenanfang [km/h]	77.2	73.5	k.M.	73.8
Vm Bogenmitte [km/h]	77.1	72.7	k.M.	73.7
V85 Zufahrt [km/h]	90	k.M.	k.M.	82
V85 Bogenanfang [km/h]	88.3	79	k.M.	80
V85 Bogenmitte [km/h]	89.1	77.6	k.M.	78.9
Ideal [%]	0.0	0.0	0.0	2.1
Normal [%]	17.4	18.3	0.0	8.2
Korrigieren [%]	0.0	0.3	56.3	0.7
Schneiden [%]	42.0	33.0	0.0	0.0
Ausholen [%]	1.4	0.0	0.0	0.7
Hinaustr. [%]	1.4	3.9	4.2	0.0
Uebrige [%]	37.7	44.6	39.6	88.4

C Auswertungen Unfalldaten

C.1 Unfalldaten (Teil 1/2)

Kurvenort	Aarau	Seon	Egliswil	Birmenstorf - Gebenstorf	Mülligen
Anzahl Unfälle (01.01.2000 – 31.12.2009)	10	10	11	11	14
Fahrtrichtung Linkskurve	3	5	11	8	8
Fahrtrichtung Rechtskurve	7	5	0	3	6
Radius	118.3	213.6	86.9	233	70
Krümmungsrichtung (Hin)	Rechtskurve	Linkskurve	Linkskurve	Linkskurve	Rechtskurve
Winkeländerung	76	26	54	64	82
Übergangsbogen	ja	ja	nein	ja	ja
Summe Länge	157.8	97.3	82.5	262.0	100.0
Länge der Zufahrtsgeraden	40.0	47.7	43.9	50.0	50.0
Breite der Zufahrtsgeraden	3.4	3.5	3.1	3.4	3.0
Breite in Bogenmitte	3.3	3.7	3.3	3.5	3.0
p Bogenmitte [%]	7.0	3.0	1.0	6.3	6.0
i (ca. +/- %) bzgl. Hinverkehr	0.0	0.0	-5.0	3.0	0.5
Sicht nach innen	2	2	1	3	2
Sicherheitslinie durchgezogen	ja	ja	nein	ja	nein
Randmarkierung	ja	ja	nein	ja	nein
Mittellinie gestrichelt	nein	nein	nein	ja	ja
Streckencharakteristik	gestreckt	gestreckt	kurvig	gestreckt	kurvig
Kurvenlage	freies Feld	freies Feld	einseitige Vegetation	einseitige Vegetation	Wald
DTV	8193	10972	4000	13182	2918
Höchstgeschwindigkeit	80	80	80	80	60
Geschwindigkeit-Signal	nicht sig.	nicht sig.	nicht sig.	nicht sig.	signalisiert
Strassenanlage	eben	eben	Gefälle	Steigung	eben
Strassenbeleuchtung	keine	keine	keine	keine	keine
Streckentyp	HVS	HVS	lokale VS	HVS	lokale VS

C.1 Unfalldaten (Teil 2/2)

Kurvenort	Wohlen	Bremgarten	Frick	Windisch	Koblenz
Anzahl Unfälle (01.01.2000 – 31.12.2009)	15	17	18	19	23
Fahrtrichtung Linkskurve	7	12	15	9	3
Fahrtrichtung Rechtskurve	8	5	3	10	20
Radius	160	99.5	65	51	150
Krümmungsrichtung (Hin)	Linkskurve	Linkskurve	Linkskurve	Rechtskurve	Rechtskurve
Winkeländerung	24	77	55	139	113
Übergangsbogen	nein	ja	nein	nein	ja
Summe Länge	68.4	133.9	62.4	124.1	295.0
Länge der Zufahrtsgeraden	47.1	29.7	45.0	50.5	0.0
Breite der Zufahrtsgeraden	3.6	3.8	3.1	3.8	3.8
Breite in Bogenmitte	4.2	4.2	3.1	4.3	3.8
p Bogenmitte [%]	5.7	6.7	5.0	10.3	7.0
i (ca. +/- %) bzgl. Hinverkehr	-3.0	1.5	-2.0	5.0	-2.0
Sicht nach innen	2	2	2	3	2
Sicherheitslinie durchgezogen	ja	ja	nein	ja	ja
Randmarkierung	ja	ja	ja	ja	ja
Mittellinie gestrichelt	ja	nein	ja	nein	nein
Streckencharakteristik	gestreckt	gestreckt	kurvig	gestreckt	gestreckt
Kurvenlage	Wald	Wald	einseitige Vegetation	freies Feld	freies Feld
DTV	12063	10829	4083	11916	5282
Höchstgeschwindigkeit	80	80	80	60	80
Geschwindigkeit-Signal	nicht sig.	nicht sig.	nicht sig.	signalisiert	nicht sig.
Strassenanlage	Gefälle	eben	Gefälle	Steigung	eben
Strassenbeleuchtung	keine	keine	keine	durchgehend	keine
Streckentyp	HVS	HVS	HVS	HVS	HVS

C.2 Rough Set Analyse Unfalldaten (nächste Seite)

Wenn alle Unfälle die den gleichen them-Teil haben auch den gleichen if-Teil haben ist die coverage gleich eins

ist gleich Anzahl Zeilen (Unfälle), die zu einer Regel passen,

Unfalltyp accuracy (Bsp. 33% der UT der Regel 2 sind UT Nr. 01)

Unfalltyp coverage (Wie viel % der Unfälle Typ 1 erklärt die Regel nr. 2? 3%)

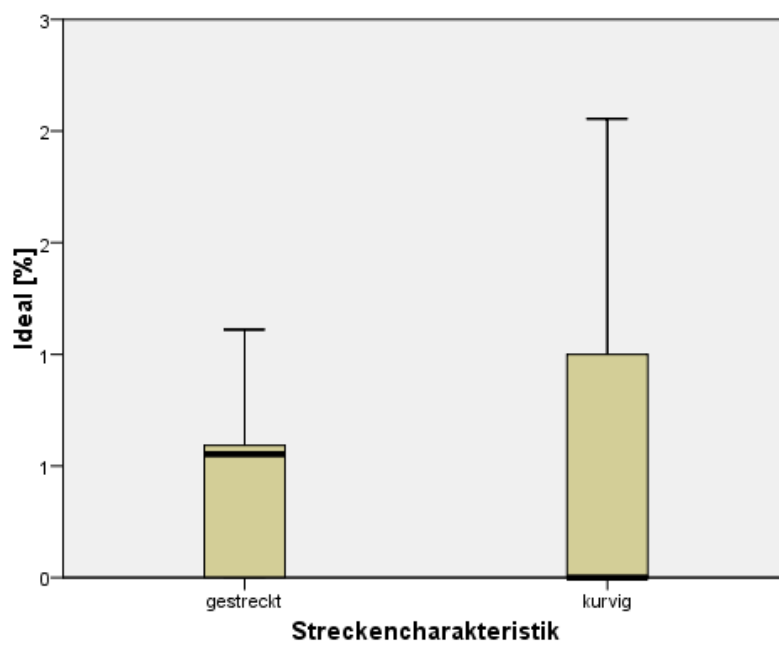
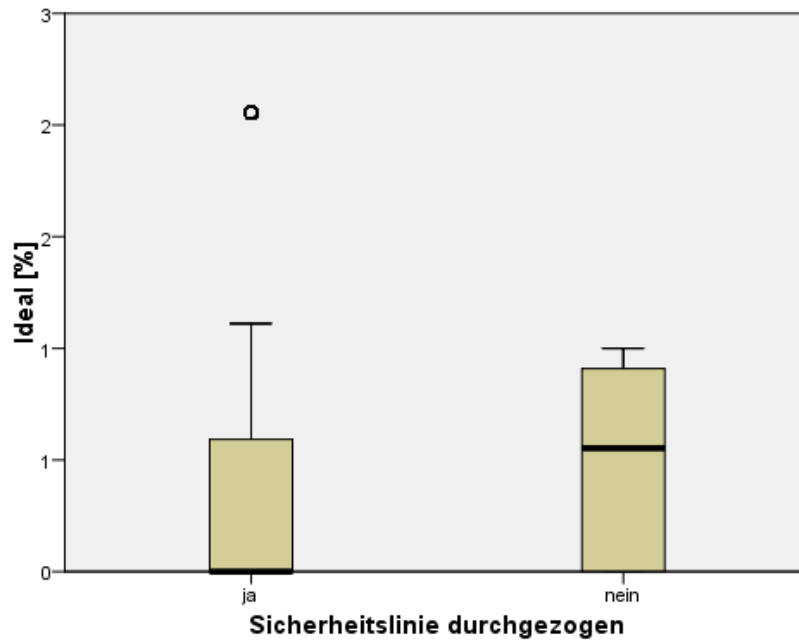
Strassenbeleuchtung	Krümmungsrichtung	Radius	Kurvenlage	Höchstgeschwindigkeit	P in Bogenmitte	LHS Support, "rule strength"	1	3	5	6	10	60	61	1	3	5	6	10	60	61	LHS coverage
keine	Linkscurve	<120m	freies Feld	60	>7%	2	33%	67%				100%		3%	3%				18%		1.35%
keine	Linkscurve	<120m	freies Feld	80	>7%	3	33%	100%						3%	3%						2.03%
keine	Linkscurve	<120m	Wald oder einseitige Vegetation	50	<3%	2	100%	75%						5%	8%						1.35%
keine	Linkscurve	<120m	Wald oder einseitige Vegetation	60	5-6%	8	25%	25%						3%	3%						5.41%
keine	Linkscurve	<120m	Wald oder einseitige Vegetation	60	5-6%	1	100%	75%						3%	3%						0.68%
keine	Linkscurve	<120m	Wald oder einseitige Vegetation	80	<3%	8	35%	44%						5%	8%						5.41%
keine	Linkscurve	<120m	Wald oder einseitige Vegetation	80	5-6%	14	43%	50%						15%	10%						6.08%
keine	Linkscurve	<120m	Wald oder einseitige Vegetation	80	6-7%	4	100%	75%				25%		3%	4%						9.46%
keine	Linkscurve	>=120m	freies Feld	50	>7%	1	100%							10%							2.70%
keine	Linkscurve	>=120m	freies Feld	80	3-4%	5	80%						20%								0.68%
keine	Linkscurve	>=120m	freies Feld	80	>7%	2	29%	57%				100%		5%	6%				18%		3.38%
keine	Linkscurve	>=120m	Wald oder einseitige Vegetation	80	5-6%	7	63%	25%					14%	13%	3%						1.35%
keine	Linkscurve	>=120m	Wald oder einseitige Vegetation	80	6-7%	8	100%	25%					13%	13%	3%						4.73%
keine	Rechtscurve	<120m	freies Feld	80	>7%	1	100%							3%	3%						5.41%
keine	Rechtscurve	<120m	freies Feld	80	>7%	7	100%	29%			14%		57%	3%	3%				100%		0.68%
keine	Rechtscurve	<120m	Wald oder einseitige Vegetation	60	>7%	6	35%	67%						5%	6%						4.73%
keine	Rechtscurve	<120m	Wald oder einseitige Vegetation	60	>7%	4	25%	50%						3%	3%						4.05%
keine	Rechtscurve	<120m	Wald oder einseitige Vegetation	80	5-6%	3	25%	50%				33%	67%	3%	3%						2.70%
keine	Rechtscurve	<120m	Wald oder einseitige Vegetation	80	>7%	1	100%							1%	1%						2.03%
keine	Rechtscurve	>=120m	freies Feld	50	>7%	11	18%	45%				18%									0.68%
keine	Rechtscurve	>=120m	freies Feld	80	>7%	1	100%							18%							7.43%
keine	Rechtscurve	>=120m	freies Feld	80	3-4%	5	20%	20%						7%	1%						0.68%
keine	Rechtscurve	>=120m	freies Feld	80	>7%	8	38%	38%				20%	40%	7%	1%						3.38%
keine	Rechtscurve	>=120m	Wald oder einseitige Vegetation	80	5-6%	8	67%	75%				13%	13%	8%	4%						5.41%
keine	Rechtscurve	>=120m	Wald oder einseitige Vegetation	80	6-7%	3	67%	75%	13%					5%	8%						5.41%
durchgehend	Linkscurve	<120m	freies Feld	60	>7%	4	25%	75%						3%	4%						2.03%
durchgehend	Rechtscurve	<120m	freies Feld	60	>7%	3	100%	33%						4%	4%						2.03%
andere	Linkscurve	<120m	freies Feld	80	>7%	3							67%	1%	1%						2.03%
andere	Rechtscurve	<120m	freies Feld	80	>7%	5		80%					20%	6%	6%						3.38%
andere	Rechtscurve	<120m	freies Feld	80	>7%	1							100%	100%	100%						100.00%

Linkscurve	70%	56%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	35%	55%
Rechtscurve	30%	44%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	65%	45%

D Auswertungen Spurdaten

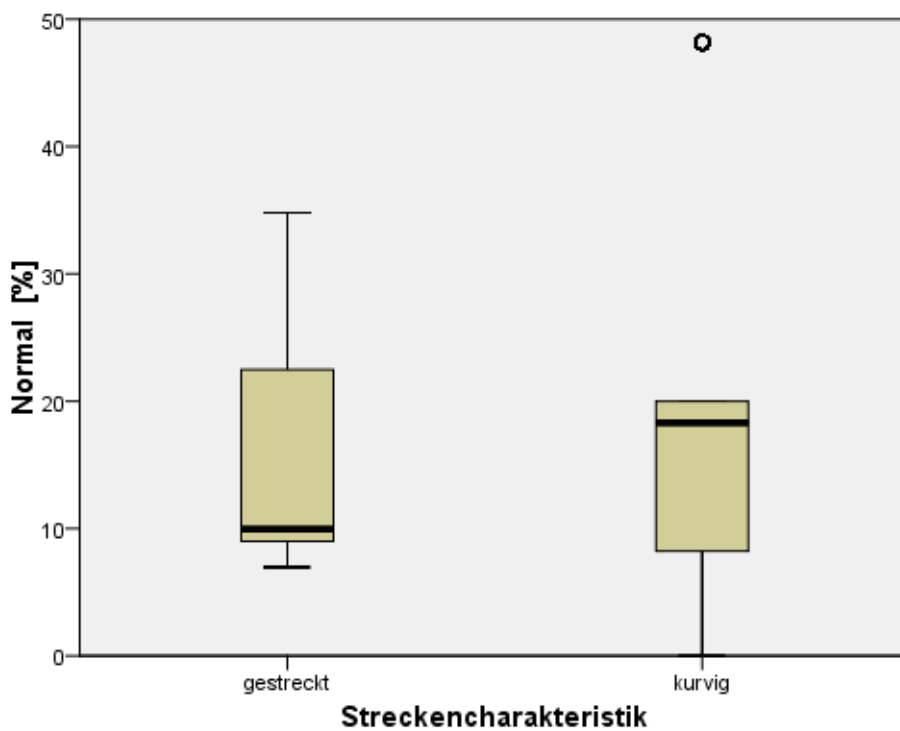
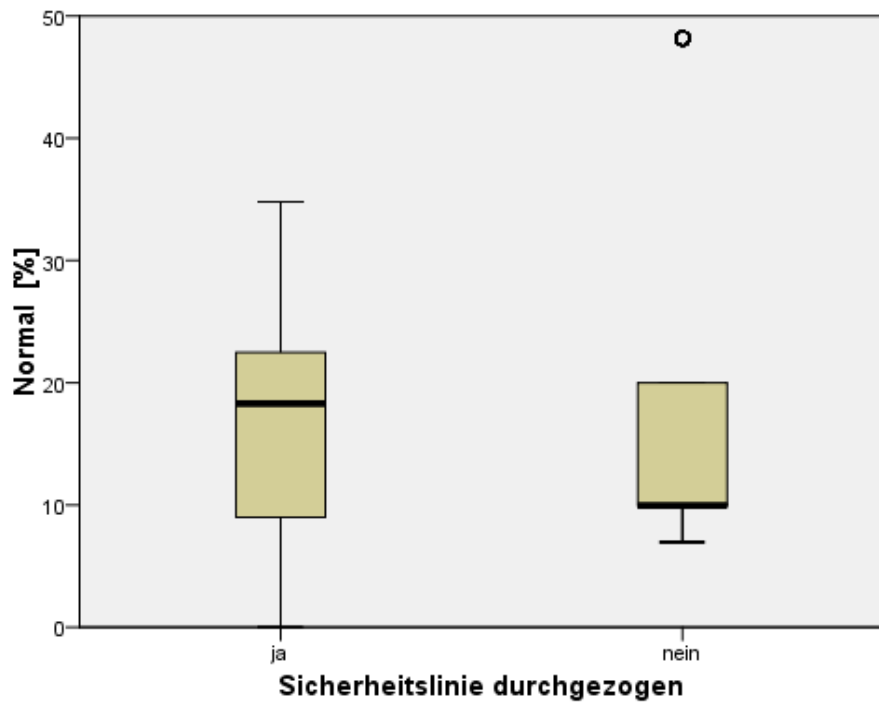
D.1 Regressionsanalysen Spurdaten

Abbildung D-1: Sicherheitslinie, Streckencharakteristik und Spurtyp „Ideal“



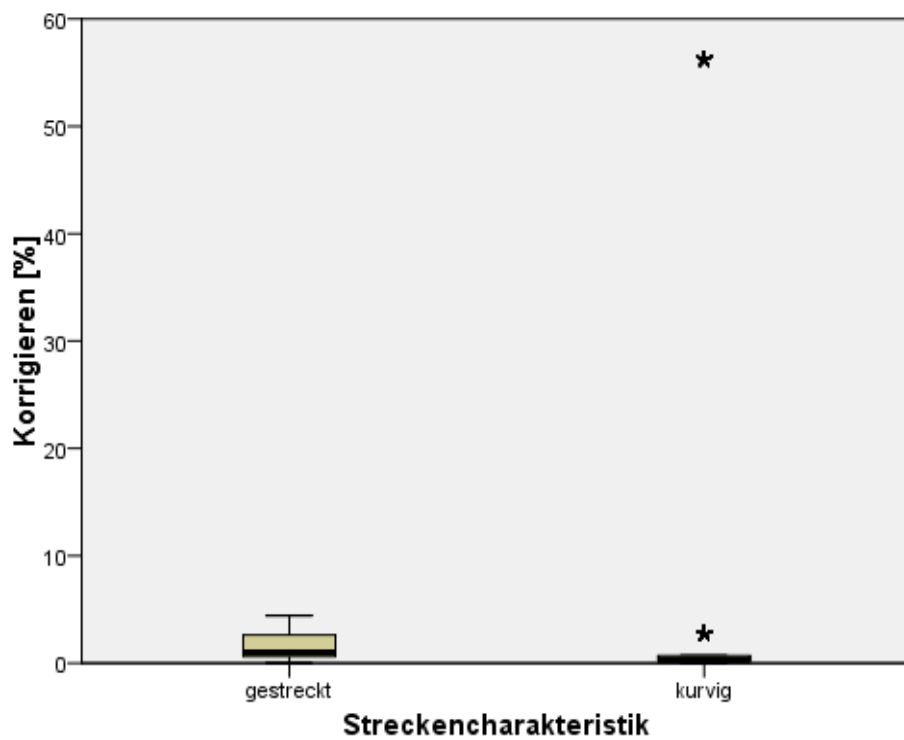
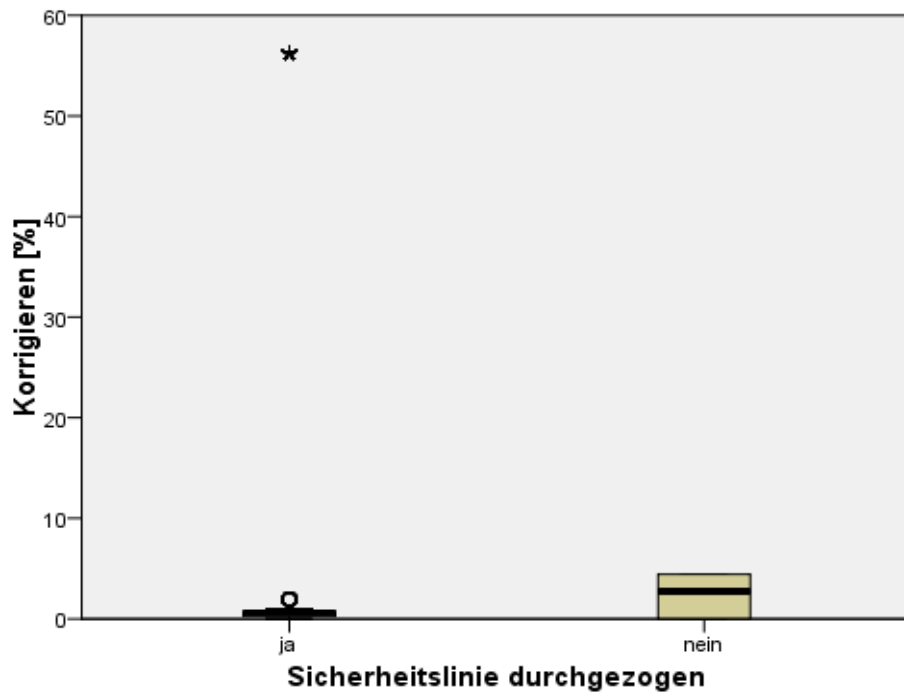
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung D-2: Sicherheitslinie, Streckencharakteristik und Spurtyp „Normal“



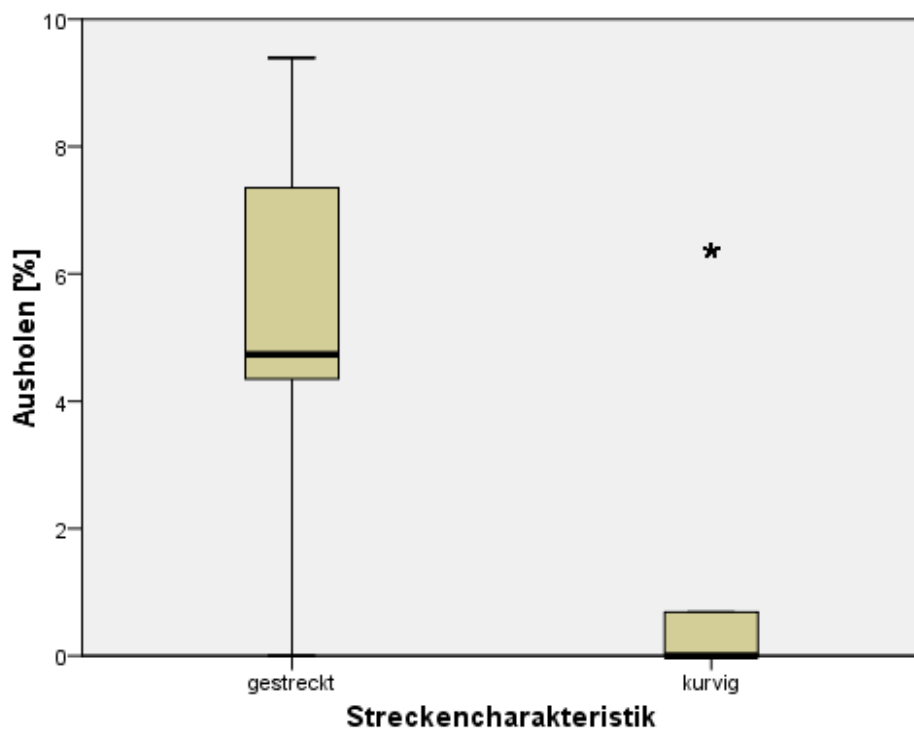
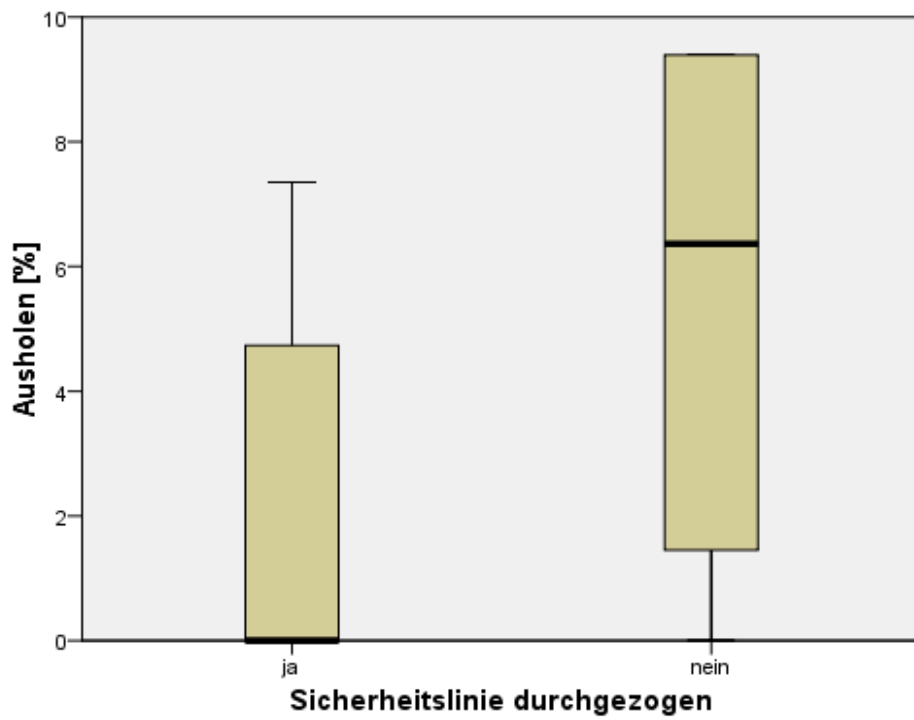
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung D-3: Sicherheitslinie, Streckencharakteristik und Spurtyp „Korrigieren“



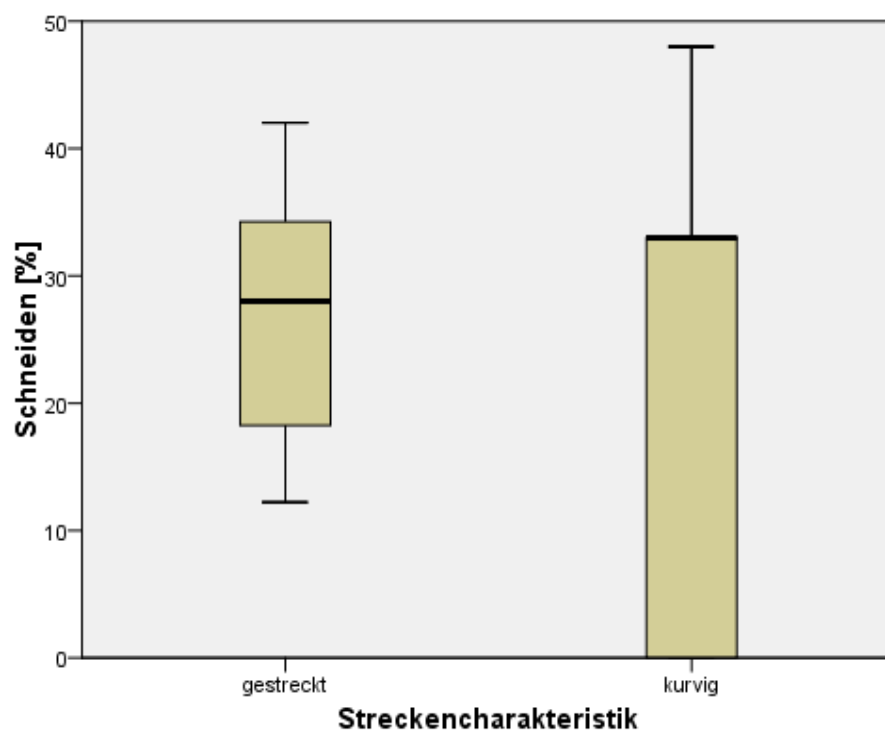
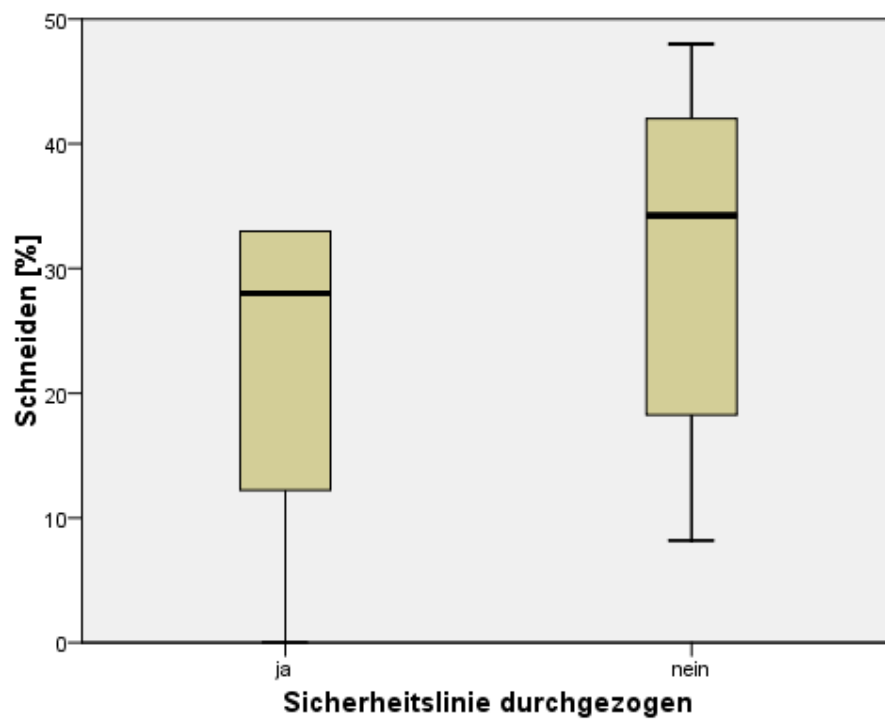
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung D-4: Sicherheitslinie, Streckencharakteristik und Spurtyp „Ausholen“



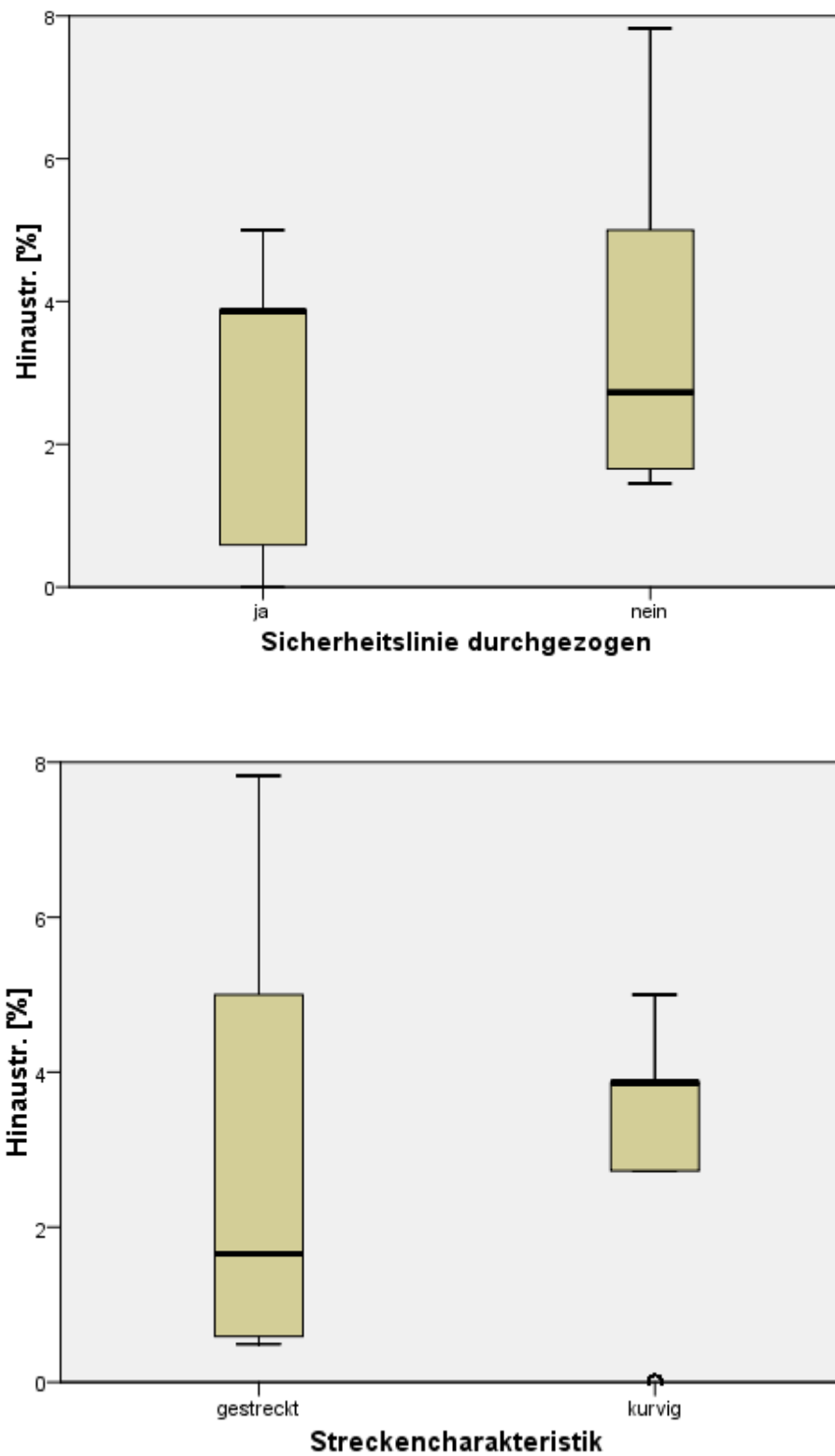
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung D-5: Sicherheitslinie, Streckencharakteristik und Spurtyp „Schneiden“



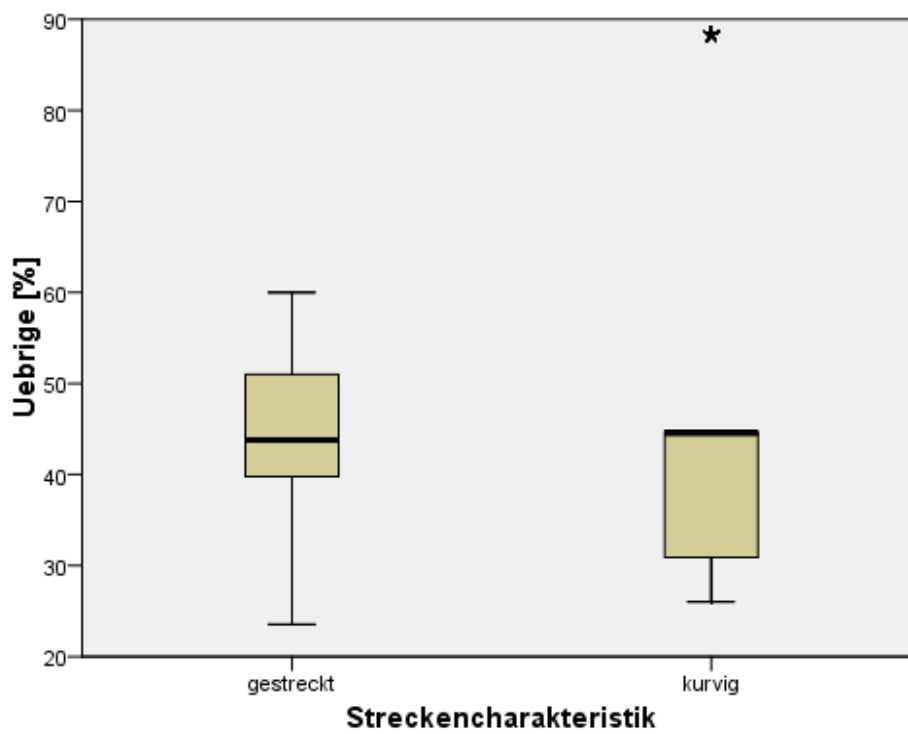
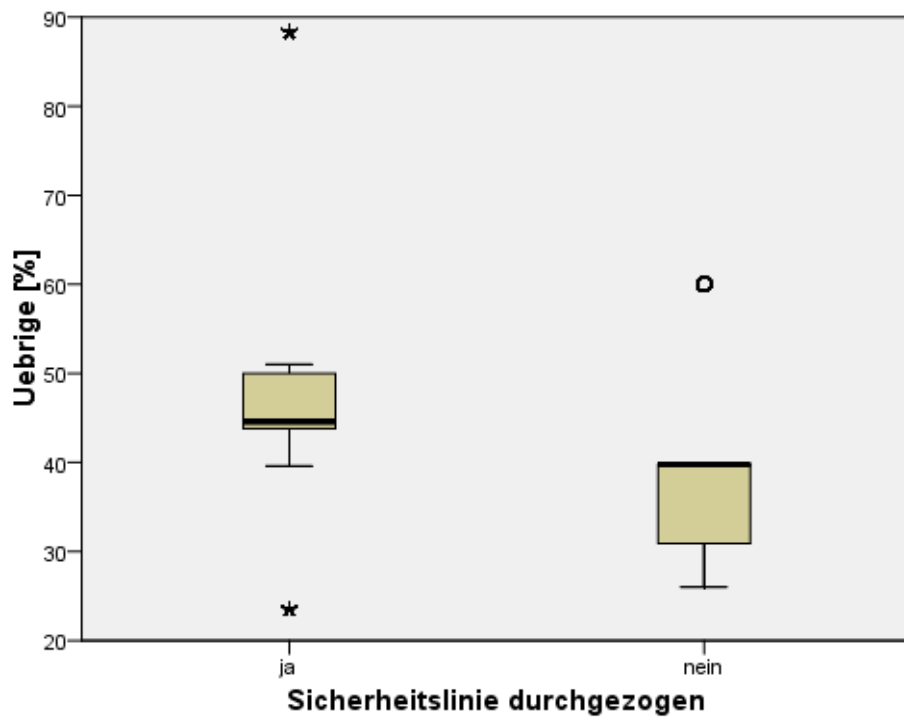
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung D-6: Sicherheitslinie, Streckencharakteristik und Spurtyp „Hinaustragen“



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung D-7: Sicherheitslinie, Streckencharakteristik und Spurtyp „Übrige“



Quelle: eigene Darstellung

Literaturverzeichnis

Alessandrini, M. (2008). Rough Sets; Seminar, Ausgewählte Kapitel des Softcomputings. Prof. Dr. W.-M. Lippe and D. D. Lammers. Münster, Westfälische Wilhelms-Universität Münster. WS 07/08.

Appelt, V. and G. Weise (1999). "Neue Ansätze zur Bewertung der räumlichen Linienführung von Ausserortsstrassen mit sichtbaren Radien." *Strasse und Autobahn* 50(6): 304-313.

Bakaba, J. E. (2005). "Streckentypisierung und Geschwindigkeiten - Ein Ansatz zur Differenzierung des Geschwindigkeitsverhaltens unbeeinflusster Fahrer auf zweistreifigen Ausserortsstrassen." *Strassenverkehrstechnik* 49(10): 508-516.

Bartmann, A., W. Spijkers and M. Hess (1991). *Street Environment, Driving Speed and Field of Vision. Vision in Vehicles - III.* A. G. Gale, Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland).

Belopitov, I. and P. Spacek (1999). *Geschwindigkeiten in Kurven.* Bern, Institut für Verkehrsplanung Transporttechnik Strassen- und Eisenbahnbau (Zürich),

Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute VSS,

Eidgenössisches Departement für Umwelt Verkehr Energie und Kommunikation Bundesamt für Strassen

Breuer, B. and K. H. Bill (2006). *Bremsenhandbuch.* Wiesbaden, Verlag Fried. Vieweg und Sohn

Brilon, W. and M. Döhler (1978). "Spurverhalten auf zweispurigen Landstrassen mit Gegenverkehr." *Strassenverkehrstechnik* 3: 79-82.

Brosius, F. (2013). *SPSS 21.* Heidelberg, München, Landsberg, Frechen, Hamburg, mitp

Burger, W. (1977). "Spurverhalten von Kraftfahrzeugen auf zweistreifigen Strassen mit Gegenverkehr bei unterschiedlichen Strassenzuständen und Querschnitten." *Strasse und Autobahn* 28(12): 531-535.

Buzan, T. and B. Buzan (2002). *Das Mind-Map-Buch. Die beste Methode zur Steigerung ihres geistigen Potentials.,* Moderne Verlagsgesellschaft Mvg.

Charlton, S. G. (2007). "The role of attention in horizontal curves: A comparison of advance warning, delineation , and road marking treatments." *Accident Analysis and Prevention* 39: 873-885.

- Cohen, A. S. (1985). "Visuelle Informationsaufnahme während der Fahrzeugsteuerung in Abhängigkeit der Umweltmerkmale und der Fahrpraxis." Schweizerische Zeitschrift für Psychologie 44(4): 249-288.
- Cooper, P. J. (1997). "The Relationship Between Speeding Behaviour (as Measured by Violation Convictions) and Crash Involvement." Journal of Safety Research 28(2): 83-95.
- Coutton-Jean, C., D. R. Mestre, C. Goulon and R. J. Bootsma (2009). "The role of edge lines in curve driving." Transportation Research Part F 12: 483-493.
- de Waard, D., F. J. J. M. Steyvers and K. Brookhuis, A. (2004). "How much visual road information is needed to drive safely and comfortably?" Safety Science 42: 639-655.
- Denton, G. G. (1966). "A subjective scale of speed when driving a motor vehicle." Ergonomics 9(3): 203-210.
- Dilling, J. (1973). Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen auf kurvigen Strecken. Bonn, Bundesminister für Verkehr, Abt. Strassenbau. Heft 151
- Donges, E. (1975). "Experimentelle Untersuchung des menschlichen Lenkverhaltens bei simulierter Strassenfahrt." Automobiltechnische Zeitschrift ATZ 77(5): 141-146.
- Donges, E. (1978). "A two-level model of driver steering behavior." Human Factors 20(6): 691-707.
- Elvik, R. (2006). "Laws of accident causation." Accident Analysis and Prevention 38: 742-747.
- Ewert, U. and P. Eberling (2009). Sicherheit auf Ausserortsstrassen. Bern, bfu - Beratungsstelle für Unfallverhütung. bfu - Report 61
- Fell, J. C. (1976). "A Motor Vehicle Accident Causal System: The Human Element." Human Factors 18(1): 85-94.
- Friedinger, C. (1980). Information und Verhalten des Autofahrers beim durchfahren von Kurven. Zürich
- Friedinger, C. (1982). "Informationsaufnahme und Fahrverhalten." Strasse und Verkehr 10: 310-312.
- Friedinger, C. (1984). Die situative Geschwindigkeit, ein Masstab zur Beurteilung von Kurven. Zürich, Ivt

- Glennon, J. and G. D. Weaver (1971). The relationship of vehicle paths to highway curve design, Texas Transportation Institute. Research Report No. 134-5.
- Godley, S. T., T. J. Triggs and B. N. Fildes (2004). "Perceptual lane width, wide perceptual road centre markings and driving speeds." *Ergonomics* 47(3): 237-256.
- Good, M. C. (1978). A review of empirical studies of driver-vehicle behavior on road curves, road curve geometry, and driver behavior, Australian Road Research Board. Special Rep. No. 15: 75-92.
- Greco, S., B. Matarazzo and R. Slowinski (2001). "Rough sets theory for multicriteria decision analysis." *European Journal of Operational Research* 129(1): 1-47.
- Gundlach, C. (2004). Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung der statistischen Versuchsplanung : Systemanalyse, Versuchsstrategie, Versuchsdurchführung, Versuchsauswertung. Kassel, Kassel Univ. Press
- Haglund, M. and L. Ahberg (2000). "Speed choice in relation to speed limit and influences from other drivers." *Transportation Research Part F* 3(1): 39-51.
- Haken, K.-L. (2013). Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik, Hanser.
- Heissing, B. and M. Ersoy, Eds. (2008). Fahrwerkhandbuch; Grundlagen Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg. Pages.
- Herberg, K.-W. (1983). "Geschwindigkeit - eine verkehrspsychologische Betrachtung." *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 29(4): 154-161.
- Höfner, K. J. and J. Hoskovec (1973). "Registrierung der Blickbewegungen beim Autofahren - bisherige Forschung." *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 19(4): 222-241.
- Jürgensohn, T., M. Neculau and H. P. Willumeit (1991). Visual scanning pattern in curve negotiation. *Vision in Vehicles - III*. A. G. Gale, Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland): 171-178.
- Kanellaidis, G. (1995). "Factors Affecting Drivers' Choice of Speed on Roadway Curves." *Journal of Safety Research* 26(1): 49-56.
- Kanellaidis, G. and I. Dimitropoulos (1994). "Subjective and objective evaluation of risk on roadway curves." *Traffic Engineering and Control* 35(7/8): 451-454.

Kayser, H. J., W. Möhler and N. Otten (1985). Quantitative Erfassung des Strassenraumes (unter Berücksichtigung bebauter Stadtrandgebiete). Bonn-Bad Godesberg, Bundesminister für Verkehr; Abteilung Strassenbau. Heft 452

Kern, J. (2009). Ishikawa Diagramme - Ursache-Wirkungs-Diagramme. München, Grin Verlag

Knoflacher, H. (1976). "Beitrag zum Seitenabstandverhalten auf Freilandstrasse." Strassenverkehrstechnik 1: 4-8.

Köppel, G. and H. Bock (1979). Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Kurvigkeit. Bonn-Bad Godesberg. Heft 269

Land, M. and J. Horwood (1995). "Which parts of the road guide steering?" Nature 377: 339-340.

Land, M. F. and J. Horwood (1998). How speed affects the way visual information is used in steering. Vision in Vehicles - VI. A. G. Gale, Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland): 43-50.

Landwehr, K. (1991). Optical guidance revisited. Vision in Vehicles - III. A. G. Gale, Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland) 187-194.

Leemann, N. (2007). Analyse von Zusammenhängen zwischen Veränderungen an Anlage und Verkehrsablauf und dem Unfallgeschehen - Ableitung von Quantifizierungswerkzeugen zur Beurteilung der Verkehrssicherheit, Diplomarbeit am Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, ETH Zürich

Leemann, N., Lindenmann, H.P., Spacek, P. (2010). Sicherheit von Verkehrsanlagen. Vorlesungsskript, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, ETH Zürich

Lenz, K.-H. and W. Burger (1975). "Spurverhalten von Kraftfahrzeugen auf einer zweispurigen Landstrasse." Strasse und Autobahn 11: 419-423.

Leutzbach, W., W. Maier and M. Döhler (1981). "Untersuchung des Spurverhaltens von Kraftfahrzeugen auf Landstrassen durch Verfolgungsfahrten." Strasse und Autobahn 32(8): 301-304.

Lindenmann, H.-P., F. Baumgartner, A. Jacot and E. Kälin (2010). Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassengriffigkeit. Zürich, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS). 1366

Lippold, C., M. Dietze, H.-P. Krüger and R. Scheuchenpflug (2006). "Einfluss der Strassenbepflanzung und Seitenraumgestaltung auf das Verhalten der Verkehrsteilnehmer und auf die Sicherheit im Strassenverkehr." Strasse und Autobahn 11: 670-677.

- Mannering, F. (2009). "An empirical analysis of driver perceptions of the relationship between speed limits and safety." *Transportation Research Part F* 12: 99-106.
- Milosevic, S. and J. Milic (1990). "Speed Perception in Road Curves." *Journal of Safety Research* 21: 19-23.
- Mintsis, G. (1988). "Speed distributions on road curves." *Traffic Engineering and Control* 29(1): 21-27.
- Mourant, R. R. and T. H. Rockwell (1970). "Mapping eye movement patterns to the visual scene in driving: an exploratory study." *Human Factors* 12(1): 81-87.
- Mourant, R. R. and T. H. Rockwell (1972). "Strategies of Visual Search by Novice and Experienced Drivers." *Human Factors* 14(4): 325-335.
- Mourant, R. R. and T. H. Rockwell (1972). "Strategies of visual search by novice and experienced drivers." *Human Factors* 14: 325-335.
- Osaka, N. (1991). Effects of window size and eccentricity upon eye fixation and reaction time in negotiation of curves. *Vision in Vehicles - III*. A. G. Gale, Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland): 179-186.
- Pawlak, Z. (1982). "Rough sets." *International Journal of Parallel Programming* 11(5): 341-356.
- Retting, R. A. and C. M. Farmer (1998). "Use of pavement markings to reduce excessive traffic speeds on hazardous curves." *ITE Journal* September: 30-36.
- Riemersma, J. B. J. (1984). *Driving behavior in road curves. A review of literature*. Soesterberg, The Netherlands: Institute for Perception. Report TNO, IZF 1984 C-12.
- Rosey, F., J.-M. Auberlet, J. Bertrand and P. Plainchault (2008). "Impact of perceptual treatments on lateral control during driving on crest vertical curves: a driving simulator study." *Accident Analysis and Prevention* 40: 1513-1523.
- Rudinger, G. and H. Holte (1994). "Die subjektive Sicherheitsbewertung von Baumalleen mit Varianten der Strassenausstattung." *Strassenverkehrstechnik* 5: 291-294.
- Scheifele, U. and P. Spacek (1992). *Messpfosten - Eine Messeinrichtung für Erhebungen des Fahrverhaltens auf Strassen*. Zürich, Planitronic Zürich; IVT ETH Zürich.

Schlichter, H. G. (1976). "Streckencharakteristik - Eine analytische Betrachtung." *Strasse und Autobahn* 27(2): 55-58.

Schmidl, S. (2011). Untersuchung des Fahrverhaltens in unterschiedlichen Kurvenradien bei trockener Fahrbahn. P. Maurer, W. J. Berger and P. Nitsche. Wien, Institut für Verkehrswesen; Department für Raum, Landschaft und Infrastruktur; Universität für Bodenkultur Wien. Masterarbeit für das Fachgebiet Verkehrswesen.

Schmidt, G. (2009). *Organisation und Business Analysis - Methoden und Techniken*. Giessen, Verlag Dr. Götz Schmidt. 14. Auflage

Shinar, D. (1977). "Curve Perception and Accidents on Curves: An Illusive Curve Phenomenon?" *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 23(1): 16-21.

Shinar, D. (1984). "The traffic conflict technique: a subjective vs. objective approach." *Journal of Safety Research* 15: 153-157.

Spacek, P. (1998). Fahrverhalten und Unfallgeschehen in Kurven, Fahrverhalten in Kurvenbereichen. Schriftenreihe Nr. 410 des EVED. Zürich, IVT-ETH Zürich. Forschungsauftrag Nr. 16/84.

Spacek, P. (2008). *Entwurf von Strassen - Grundzüge*. Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme ETH Zürich

Steyer, R. (2004). Beitrag zur Erhöhung der Fahrsicherheit in Kurvenbereichen zweistreifiger Ausserortsstrassen. Dresden, Schriftenreihe des Lehrstuhls Gestaltung von Strassenverkehrsanlagen. Heft 6

Steyvers, F. J. J. M. (1998). Categorisation And Appraisal Of Rural Two-Lane Undivided 80-Km/H Roads. *Vision in Vehicles - VI*. A. G. Gale, Elsevier Science Publishers (Amsterdam): 271-278.

Steyvers, F. J. J. M. (1999). Increasing Safety by Removing Visual Cues - a Contradiction? *Vision in Vehicles - VII*. A. G. Gale, Elsevier Science Publishers (Amsterdam): 301-310.

Steyvers, F. J. J. M. and D. De Waard (2000). "Road-edge delineation in rural areas: effects on driving behaviour." *Ergonomics* 43(2): 223-238.

Trapp, K.-H. and F.-W. Oellers (1974). *Streckencharakteristik und Fahrverhalten auf zweispurigen Landstrassen*. Bonn, Bundesminister für Verkehr Abt. Strassenbau. Heft 176

Trzesniowski, M. (2010). *Rennwagentechnik*. Wiesbaden, Vieweg und Teubner Verlag. 2. Auflage

Underwood, G., P. Chapman, D. Crundall, S. Cooper and R. Wallén (1999). The visual control of steering and driving: Where do we look when negotiating curves? *Vision in Vehicles - VII*. A. G. Gale, Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland): 245-252.

Van Driel, C. J. G., R. J. Davidse and M. F. A. M. Van Maarseveen (2004). "The effects of an edgeline on speed and lateral position: a meta-analysis." *Accident Analysis and Prevention* 36(4): 671-682.

Volkenhoff, T., C. Lank and T. Becher (2009). "Fahrerverhalten auf Landstrassen - Wird die Gefahr im Annäherungsbereich von Kurven unterschätzt?" *Strasse und Autobahn* 9: 593-598.

Weise, G. and R. Steyer (1999). *Gestaltungskriterien von Landstrassenkurven*. Bremerhaven, Wirtschaftsverlag NW. Verkehrstechnik Heft V 63

Lebenslauf

Franziska Barbara Baumgartner

Dipl. Bauing. ETH

* 21. Februar 1980 von Kirchlindach BE

Ausbildung

2008 – 2014 Doktoratsstudium an der ETH Zürich

2001 - 2007 Studium Bauingenieurwesen an der ETH Zürich

1996 - 2000 Alte Kantonsschule Aarau, Matura Typus C

Berufliche Tätigkeit

2007 - 2013 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Verkehrsplanung und
Transportsysteme (IVT) der ETH Zürich

2012 - 2014 Lehrbeauftragte für Strassenbau an der Berner Fachhochschule Burgdorf

seit 2013 Verkehrsplanerin bei SNZ Ingenieure und Planer AG, Zürich