

# **Berücksichtigung von entwurfs- und sicherheitstechnischen Aspekten beim Erhaltungsmanagement von Landstraßen**

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

vorgelegt an der

Technischen Universität Dresden  
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“  
Lehrstuhl Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen

Verfasser

**Dipl.-Ing. Andreas Heine**

geboren am 05.01.1984 in Pirna

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. e. h. Christian Lippold, TU Dresden

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Frohmut Wellner, TU Dresden

Tag der Einreichung: 03.04.2019

Tag der Verteidigung: 02.10.2020

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand von Wissenschaft und Technik</b> .....	<b>3</b>
2.1	Sicherheitstechnische Aspekte bei der Festlegung von Entwurfselementen .....	3
2.1.1	Elemente des Querschnitts.....	3
2.1.2	Elemente des Lageplans .....	7
2.1.3	Elemente des Höhenplans.....	14
2.1.4	Räumliche Linienführung .....	15
2.1.5	Sichtweite .....	16
2.1.6	Verfahren zur entwurfstechnischen Bewertung von Straßen .....	17
2.1.7	Schlussfolgerungen für die Untersuchung .....	24
2.2	Stand der Regelwerke .....	26
2.2.1	Gestaltungsgrundsätze der Entwurfsrichtlinien .....	26
2.2.2	Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL) .....	27
2.2.3	Merkblatt zur Übertragung des Prinzips der Entwurfsklassen auf bestehende Straßen (M EKLBest).....	32
2.2.4	Erhaltungsplanung .....	34
2.2.5	Schlussfolgerungen für die Untersuchung .....	36
<b>3</b>	<b>Ziel der Arbeit und Vorgehensweise</b> .....	<b>38</b>
3.1	Ziel und Abgrenzung der Arbeit .....	38
3.2	Allgemeine Vorgehensweise .....	39
3.3	Möglichkeiten der Datenbereitstellung und Datenerhebung .....	41
3.3.1	Straßendatenbanken .....	41
3.3.2	Kinematische Datenerfassung und Datenaufbereitung .....	43
3.4	Netzweite Berechnung entwurfstechnischer Parameter.....	45
3.4.1	Abgrenzung der Straßenabschnitte .....	45
3.4.2	Berechnung der Fahrbahnbreite .....	46
3.4.3	Berechnung der Elementrelationen .....	47
3.4.4	Berechnung der Kurvigkeitsdifferenzen .....	48
3.4.5	Detektierung von kritischen Sichtschattenbereichen.....	49
3.4.6	Detektierung verdeckter Kurvenbeginne.....	51
3.5	Analyse des Unfallgeschehens.....	54
3.5.1	Kenngößen der Unfallanalyse .....	54
3.5.2	Netzzuordnung der Unfälle .....	55
3.5.3	Spezifizierung der Unfalldaten.....	56
3.5.4	Berechnung der relativen Unfallkenngößen.....	57
3.5.5	Bildung von Untersuchungskollektiven .....	57
3.5.6	Fahrbahnbreite .....	58
3.5.7	Kurvenradien und Elementfolgen.....	59
3.5.8	Kurvigkeit des Einzelbogens und Kurvigkeitsdifferenzen .....	63
3.5.9	Sichtschattenbereiche .....	64
3.5.10	Verdeckter Kurvenbeginn .....	65

<b>4</b>	<b>Einfluss ausgewählter Entwurfsmerkmale auf die Verkehrssicherheit</b> .....	<b>66</b>
4.1	Darstellung des Streckenkollektivs .....	66
4.2	Fahrbahnbreite .....	68
4.3	Kurvenradien und Elementfolgen.....	73
4.3.1	Kurvenradius .....	73
4.3.2	Folge gegensinnig gekrümmter Kurven .....	76
4.3.3	Folge gleichsinnig gekrümmter Kurven.....	78
4.3.4	Kurvenradien im Anschluss an Geraden.....	80
4.4	Kurvigkeit des Einzelbogens und Kurvigkeitsdifferenzen .....	82
4.4.1	Kurvigkeit des Einzelbogens.....	83
4.4.2	Kurvigkeitsdifferenzen .....	83
4.5	Kritische Sichtschattenbereiche.....	85
4.6	Verdeckter Kurvenbeginn .....	87
4.7	Zusammenfassung .....	89
<b>5</b>	<b>Konzept zur Berücksichtigung entwurfs- und sicherheitstechnischer Aspekte bei PMS</b> .....	<b>90</b>
5.1	Verfahren zur entwurfstechnischen Bewertung.....	90
5.1.1	Bewertungsphilosophie .....	90
5.1.2	Linienführung im Lageplan .....	91
5.1.3	Querschnittsgestaltung.....	93
5.1.4	Ableitung von Um-/Ausbauempfehlungen.....	96
5.2	Maßnahmen für Pavement-Management-Systeme (PMS).....	96
5.2.1	Begriffe der Baulichen Erhaltung .....	97
5.2.2	Struktur und Aufbau von PMS .....	97
5.2.3	Wahl der Erhaltungsmaßnahmen in PMS.....	98
5.2.4	Ableitung zulässiger Erhaltungsmaßnahmen für PMS .....	99
5.2.5	Berücksichtigung von Um- und Ausbaumaßnahmen in PMS .....	100
5.2.6	Bewertung von Maßnahmen in PMS .....	101
5.3	Berücksichtigung von entwurfs- und sicherheitstechnischen Aspekten bei PMS - Verfahrensablauf .....	105
5.4	Abschätzung des Ausbaubedarfs von Straßennetzen - Verfahrensablauf .....	110
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>114</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>116</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>126</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>129</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>132</b>
	<b>Anhangverzeichnis</b> .....	<b>133</b>

## 1 Einleitung

Die Straßeninfrastruktur ist die wichtigste Grundlage für die Mobilität von Wirtschaft und Gesellschaft und stellt ein großes Anlagevermögen für Bund, Bundesländer, Landkreise und Gemeinden dar. Aufgrund der hohen Beanspruchungen aus Verkehr und Witterung ist die Infrastruktur kontinuierlich durch geeignete Maßnahmen zu erhalten. Der finanzielle Aufwand dafür ist enorm und nimmt einen großen Teil der zur Verfügung stehenden Mittel des Straßenhaushaltes ein (ELSNER 2018). Allein für die Bundesfernstraßen wird zukünftig ein jährlicher Erhaltungsbedarf von über drei Milliarden Euro geschätzt (SCHRÖDER 2013). Allerdings werden nicht ausreichend finanzielle Mittel bereitgestellt, um diese Aufwendungen zu decken. Die wirtschaftliche und bedarfsgerechte Verteilung bzw. Zuweisung der verfügbaren Haushaltsmittel ist somit eine vordringliche Aufgabe der Straßenbaulastträger.

Die Erhaltungsplanung wurde dazu in den vergangenen Jahren stärker systematisiert. Auf Netzebene werden durch die „Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen“ (RPE-Stra 01 - FGSV 2001a) Verfahren beschrieben, um an formulierten Zielen ausgerichtete und strategische Erhaltungsprogramme aufzustellen. Zur Darstellung netzweiter Strategieszenarien werden heutzutage Pavement-Management-Systeme (PMS) eingesetzt. Sie ermitteln diejenigen Erhaltungsmaßnahmen, die bei vorgegebenem Betrachtungszeitraum und Mitteleinsatz den maximalen Nutzen (Verbesserung des Straßenzustands) versprechen. Pavement-Management-Systeme wurden in mehreren Pilotanwendungen getestet und stetig an aktuelle Anforderungen/Erkenntnisse angepasst. Es hat sich als geeignetes Werkzeug für die Erhaltungsplanung erwiesen (MAERSCHALK/KRAUSE 2004).

Die Erhaltungsmaßnahmen können hinsichtlich ihres Umfangs nach Maßnahmen der Instandsetzung und Erneuerung differenziert werden. Instandsetzungen sind im Allgemeinen Maßnahmen auf (I1) bzw. an der Deckschicht (I2). Erneuerungen schließen Arbeiten an der Decke (E1) bzw. an den Tragschichten (E2) ein. Der verbesserte Fahrbahnzustand und der Eindruck einer neuen, richtliniengerechten Straße, der speziell bei Erneuerungsmaßnahmen entsteht, führt erfahrungsgemäß zu höheren Geschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmer (WEISE 1991). Diese geschwindigkeitserhöhende Wirkung ist insbesondere auf Landstraßen<sup>1</sup> kritisch zu prüfen.

Die Landstraßen in der Bundesrepublik Deutschland sind in ihrer Gestaltung sehr heterogen. Aus Netzergänzungen, den Bau von Ortsumgehungen und grundlegenden Modernisierungen sind sukzessive Streckenabschnitte entstanden, die den Anforderungen aktueller Regelwerke hinsichtlich Verkehrssicherheit und Leistungsfähigkeit genügen. Demgegenüber existieren Straßen, deren Linienführung aus den Anfängen des motorisierten Individualverkehrs stammt und die im Zuge von Erhaltungsarbeiten nur ungenügend an die Entwurfsparameter der entsprechenden Regelwerke angepasst wurden. Sie entsprechen oft nicht dem Stand der Technik.

Diese Tatsache spiegelt sich auch im Unfallgeschehen wider. In Deutschland wurden im Jahr 2017 insgesamt 302.656 Unfälle mit Personenschäden polizeilich erfasst. Obwohl sich über zwei Drittel der Unfälle innerorts ereigneten, waren ca. 57 % der Verkehrstoten auf Landstraßen zu verzeichnen. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der

---

<sup>1</sup> Landstraßen im Sinne dieser Arbeit sind anbaufreie, einbahnige Außerortsstraßen der Straßenkategorien LS I bis LS IV.

Verteilung der Schwerverletzten (DESTATIS 2017). Diese besondere Unfallschwere auf Landstraßen ist u. a. auf das instabile Verhältnis von dem vorhandenen Geschwindigkeitsniveau zu der Güte der Gestaltung zurückzuführen. Nicht angepasste Geschwindigkeit ist außerorts die Hauptunfallursache bei Unfällen mit Getöteten (DESTATIS 2017). Die Unfallstatistik unterstreicht also die Bedeutung, entwurfstechnische Belange auch im Zuge von Erhaltungsmaßnahmen zu berücksichtigen. Dieser Aspekt wird ebenfalls in dem Entwurf der Richtlinien für das Sicherheitsaudit von Straßen (FGSV 2015a) angeführt, wonach künftig bei grundhaften Erhaltungsmaßnahmen Sicherheitsaudits im Bestand durchgeführt werden sollen. Trotz dieser besonderen Bedeutung sind die entwurfstechnischen Belange in den RPE-Stra 01 (FGSV 2001a) noch nicht hinreichend verankert und demzufolge auch nicht Bestandteil der Pavement-Management-Systeme.

Die Gestaltung von Landstraßen wird heute in den „Richtlinien für die Anlage von Landstraßen“ (RAL - FGSV 2012a) geregelt. Auf Grundlage standardisierter Straßentypen werden Gestaltungs- und Betriebsparameter definiert. Diese resultieren vorwiegend aus entsprechenden Sicherheitsuntersuchungen, fahrdynamischen Berechnungen und Erfahrungswerten. Die Entwurfsvorgaben enthalten dabei Sicherheitsspielräume. Geringfügige Abweichungen von den Anforderungen der Richtlinien führen nicht zwangsläufig zu einer Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit und sind je nach Kriterium und dessen Maß der Abweichung bei Straßen im Bestand vertretbar.

Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, zulässige Abweichungen von den Anforderungen der Entwurfsregelwerke genauer zu quantifizieren und auf deren Grundlage Umbau- bzw. Umgestaltungsempfehlungen abzuleiten. Diese Empfehlungen werden im Anschluss in das Erhaltungsmanagement von Landstraßen integriert und berücksichtigt. Die Bildung von Rang- und Reihenfolgen im Zuge der Erhaltungsplanung basiert, wie eingangs erwähnt, derzeit hauptsächlich auf der Verbesserung des Straßenzustands. Diese Form der Priorisierung von Streckenabschnitten soll durch sicherheitstechnische Aspekte erweitert werden.

Die nachfolgenden Untersuchungen basieren auf Daten und Berechnungen aus folgenden Forschungsprojekten, an denen der Verfasser maßgeblich beteiligt war:

- Kategorisierung der Kreisstraßen im Landkreis Mittelsachsen - Geometrische Aufnahme und entwurfstechnische Bewertung als Grundlage für die Erstellung eines Bauprogramms  
LEHMANN/HEINE (2010),
- Entwurfstechnische Bewertung des Grundnetzes im Land Brandenburg  
LIPPOLD U. A. (2011b),
- Bewertungsmodell für die Verkehrssicherheit von Straßen  
MAIER U. A. (2012),
- Erhaltungsstrategie für Staatsstraßen im Freistaat Sachsen  
LERCH U. A. (2014) und
- Empfehlungen zur Vermeidung von Zusammenstößen mit dem Gegenverkehr auf Landstraßen  
BARK U. A. (2015).

## 2 Stand von Wissenschaft und Technik

### 2.1 Sicherheitstechnische Aspekte bei der Festlegung von Entwurfselementen

Der Einfluss von Entwurfsmerkmalen auf die Verkehrssicherheit war Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Dabei wurden insbesondere folgende Aspekte untersucht:

- Elemente des Querschnitts,
- Elemente des Lageplans,
- Elemente des Höhenplans,
- Räumliche Linienführung und
- Sichtweite.

#### 2.1.1 Elemente des Querschnitts

##### Fahrbahn- und Fahrstreifenbreite

Die Fahrbahn setzt sich aus den Fahrstreifen, den Randstreifen und ggf. dem verkehrstechnischen Mittelstreifen zusammen (FGSV 2012a). Der Einfluss der Fahrbahnbreite auf die Verkehrssicherheit wurde in zahlreichen Untersuchungen nachgewiesen.

BITZL (1964) untersuchte Unfälle auf Strecken mit verschiedenen Fahrbahnbreiten. Dabei unterschied er fünf Querschnittstypen (vgl. Tab. 2-1). Es waren vor allem bei schmalen Straßen mit einer Breite von  $B < 5,50$  m (Querschnittstyp I) vergleichsweise hohe relative Unfallkenngrößen zu verzeichnen. Die relative Unfallziffer (Unfallrate) und der relative Gefahrengrad (entspricht in etwa der Unfallkostenrate) lagen deutlich über den Werten von breiteren einbahnigen Landstraßen (Querschnittstyp IIa).

Tab. 2-1: Unfallhäufigkeit und Gefahrengrad zwei- und vierspuriger Straßen in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite und der Spurenzahl (BITZL 1964)

Spuren- zahl	Quer- schnitt	Fahrbahnbreite	Z	$U_r$	$G_r$
2	I	< 5,50 m (einbahnig)	100	2,71	70,08
2	IIa	5,50 - 8,50 m (einbahnig)	2.115	1,84	42,69
2 - 4	III	> 8,50 m (einbahnig)	194	1,41	39,26
4	IV	2 x 7,00 m (zweibahnig)	89	1,66	30,01
4	BAB	2 x 7,50 m (zweibahnig)	3.379	1,99	34,52

Z Gesamtzahl der Unfälle (absolut)

$U_r$  relative Unfallziffer (Unfallrate)

$G_r$  relativer Gefahrengrad (entspricht in etwa der Unfallkostenrate)

In einer weiteren Untersuchung differenzierte BITZL (1967) die Fahrbahnbreiten detaillierter (1,00 m - Abstand). Dabei stellten sich qualitativ die gleichen Ergebnisse ein. Fahrbahnbreiten von  $B < 6,00$  m wiesen die höchsten Unfallraten auf. Er stellte weiterhin fest, dass auf einbahnig vierstreifigen Querschnitten eine besonders hohe Unfallschwere zu verzeichnen ist. Er empfahl daher, die Richtungsfahrbahnen bei vierstreifigen Querschnitten baulich voneinander zu trennen.

KREBS/GLÖCKNER (1977) stellten in ihren Untersuchungen fest, dass mit zunehmender Fahrbahnbreite die Unfallraten abnehmen. Dabei wiesen Strecken mit einer Fahrbahnbreite von  $B < 6,25$  m vergleichsweise hohe Werte auf (vgl. Abb. 2-1). Die Unfallkostenraten konnten diesen Trend nicht vollständig bestätigen. Hier wurde erst ab Fahrbahnbreiten von  $B \geq 6,75$  m ein Sicherheitsgewinn festgestellt. Das höhere Sicherheitsniveau war insbesondere auf den Rückgang der Fahrurfälle zurückzuführen. Dieser Trend zeigte sich bei LEUTZBACH/ZOELLMER (1989) insbesondere bei geringen Verkehrsstärken.

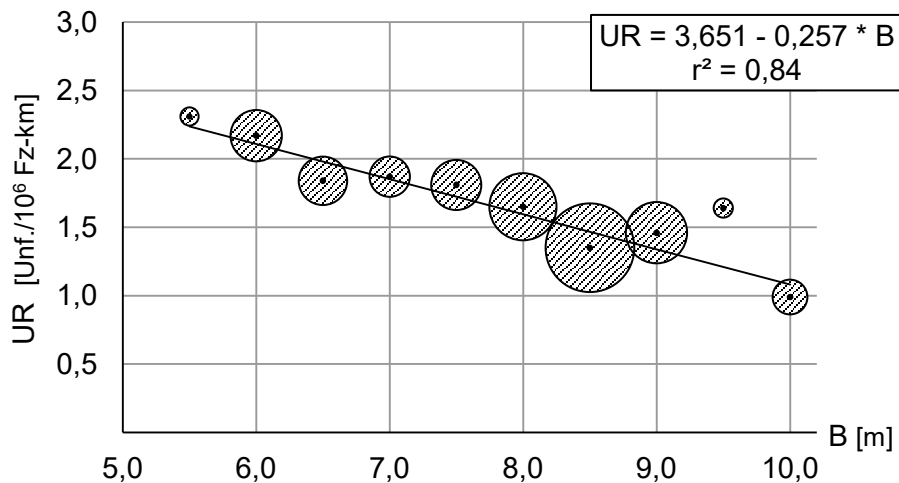


Abb. 2-1: Unfallrate als Funktion der Fahrbahnbreite nach KREBS/GLÖCKNER (1977)

KNOFLACHER U. A. (1979) und KNOFLACHER (1980) konnten den positiven Einfluss steigender Fahrbahnbreite auf die Verkehrssicherheit hingegen nicht pauschal bestätigen. Vielmehr zeigte sich ein erhöhtes Unfallgeschehen bei Straßen mit geringeren Entwurfsgeschwindigkeiten und zunehmender Fahrbahnbreite. Daher empfahlen sie, die Fahrbahnbreite auf die Entwurfsgeschwindigkeit sorgfältig abzustimmen.

BRANNOLTE U. A. (1993) untersuchten den Sicherheitseinfluss der Querschnitte der RAS-Q (FGSV 1982 - vgl. auch Tab. 2-2) und folgender Sonderquerschnitte:

- b2+1 (zusätzlicher wechselseitiger Überholfahrstreifen),
- b2s (seitliche "Mehrzweckstreifen" mit einer Breite von  $B = 1,50$  m) und
- b2ü (überbreite Fahrstreifen mit  $B = 5,25$  m).

Tab. 2-2: Straßenquerschnittsmaße einbahnig-zweistreifiger Straßen nach den RAS-Q (FGSV 1982)

Querschnitt	Fahrfstreifenbreite	Randstreifenbreite	befestigte Fahrbahnbreite
b2 (RQ 12)	3,75 m	0,25 m	8,00 m
c2 (RQ 10,5)	3,50 m	0,25 m	7,50 m
d2 (RQ 10)	3,25 m	0,25 m	7,00 m
e2 (RQ 9)	3,00 m	0,00 m <sup>2</sup>	6,00 m

Der positive Einfluss eines gesicherten Überholfahrstreifens (b2+1) auf die Verkehrssicherheit ist hier unverkennbar (vgl. Abb. 2-2). Die weiteren Querschnitte mit breiteren befestigten Flächen (b2s und b2ü) wiesen ähnliche Unfallraten wie der Querschnitt b2 auf. Allerdings ist zu erkennen, dass der Querschnitt b2ü vor allem schwere Unfälle (hohe Unfallkostenrate) zur Folge hat. Der Querschnitt c2 mit einer Fahrfstreifenbreite von  $B = 3,50$  m hatte sich hinter dem dreistreifigen Querschnitt b2+1 ebenfalls als vorteilhaft für die Verkehrssicherheit herausgestellt. Mit schmalere Fahrfstreifen- bzw. Fahrbahnbreiten nahmen die relativen Unfallkenngrößen (Unfallrate und Unfallkostenrate) zu.

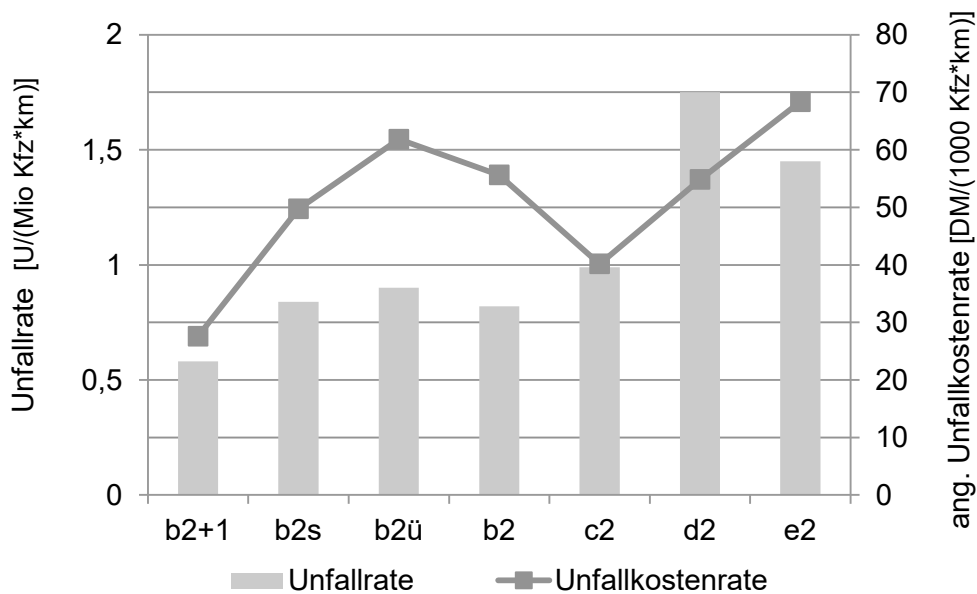


Abb. 2-2: Unfallrate und Unfallkostenrate (Unfalltypen 1 und 4-7) in Abhängigkeit vom Querschnitt nach BRANNOLTE U. A. (1993)

LAMM U. A. (1999) und PALM/SCHMIDT (1999) konnten diesen Trend sowohl für überbreite Querschnitte als auch für schmalere Fahrbahnen bestätigen. Straßen mit Fahrfstreifenbreiten von  $B = 3,50$  m wiesen hier die niedrigsten relativen Unfallkenngrößen (Unfallrate und Unfallkostenrate) auf (PALM/SCHMIDT 1999).

<sup>2</sup> Die Markierung wurde bei diesem Querschnitt unmittelbar am Fahrbahnrand aufgebracht.



VIETEN U. A. (2010) kamen in ihren Untersuchungen zu ähnlichen Ergebnissen. Fahrbahnbreiten von  $B = 8,00$  m bzw.  $B = 8,50$  m stellten sich als vorteilhaft für die Verkehrssicherheit heraus. Allerdings waren hier Fahrbahnbreiten von  $B = 7,00$  m ebenfalls vergleichsweise sicher. Erst ab Fahrbahnbreiten von  $B \leq 6,00$  m nahmen die Unfallraten und die Unfallkostenraten deutlich zu.

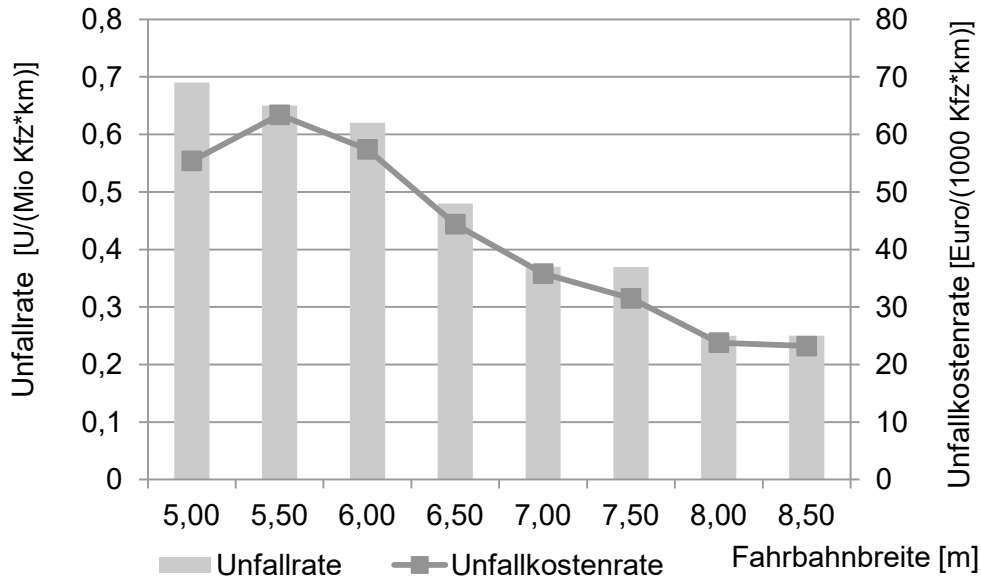


Abb. 2-3: Unfallrate und Unfallkostenrate (alle Unfalltypen) in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite nach VIETEN U. A. (2010)

MAIER U. A. (2012) konnten die bereits aufgeführten Erkenntnisse bekräftigen. Mit schmaler werdenden Fahrstreifenbreiten ( $B < 3,50$  m) steigt die Wahrscheinlichkeit von Unfällen.

Die Ergebnisse von ZIMMERMANN/RIFFEL (2013) zeigten zudem, dass vornehmlich schmale Fahrstreifenbreiten ( $B < 3,00$  m) zu kritischen Fahrspurverläufen führen können. Die Fahrlinien bei Fahrstreifenbreiten von  $B = 3,50$  m waren hingegen stets unproblematisch.

Insgesamt ist festzuhalten, dass Fahrbahnbreiten einbahnig zweistreifiger Landstraßen von  $7,00 \text{ m} \leq B \leq 8,50 \text{ m}$  sich als vergleichsweise sicher herausgestellt haben. KREBS/GLÖCKNER (1977) betonen allerdings, dass weitere Entwurfparameter (Kurvenradius, Längsneigung, DTV), die zum Teil mit der Fahrbahnbreite korrelieren, die Verkehrssicherheit ebenfalls beeinflussen. Aktuellere Untersuchungen thematisieren hingegen den möglichen Zusammenhang zwischen breiteren Querschnitten und besserer Linienführung nicht. VIETEN U. A. (2010) stellten z. B. einen deutlichen Rückgang des Anteils von Fahrnfällen mit zunehmender Fahrbahnbreite fest. Sie begründeten dies mit folgenden zwei Sachverhalten.

1. Bei breiteren Fahrbahnen besteht die Möglichkeit, Fahrfehler infolge unangepasster Geschwindigkeiten besser korrigieren zu können.
2. Aufgrund der (nachgewiesenermaßen) geringeren Verkehrsbelastung bei schmalen Querschnitten sinkt das Konfliktpotential mit anderen Verkehrsteilnehmern und somit der Anteil der Längsverkehrsunfälle.

Differenzierte Unfalluntersuchungen zu den Fahrbahnbreiten - getrennt nach den Unfalltypen 1 und 6 - haben sie daher nicht durchgeführt. Die maßgebenden Unfallkenngrößen wurden lediglich für alle Unfalltypen und für die sogenannten Streckenunfälle (Unfalltypen 1 und 4-7) berechnet.

### Anzahl der Fahrstreifen

Sicherheitsuntersuchungen zu 3- oder 4-streifigen Landstraßenquerschnitten sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Der positive Einfluss dieser Querschnitte auf die Verkehrssicherheit ist zudem hinreichend bekannt (vgl. u. a. MEEWES/MAIER 1984, FRIEDRICH U. A. 2005, IRZIK 2010, ZIERKE 2010, JÄHRIG 2012). Auf weiterführende Literatur wird an den entsprechenden Stellen verwiesen.

## 2.1.2 Elemente des Lageplans

### Kurvenradius

BITZL (1964) untersuchte u. a. den Zusammenhang zwischen Kurvenradius und Verkehrssicherheit. Es zeigte sich, dass insbesondere kleine Radien ( $R \leq 125$  m) ein geringes Sicherheitsniveau aufweisen. Radien zwischen  $125 \text{ m} < R \leq 250$  m nahmen ebenfalls noch hohe Werte in den relativen Unfallkenngrößen an. Sie waren doppelt so hoch wie die Werte der restlichen Radienklassen. BITZL (1967) empfahl daher, künftig für die Planung von Hauptstraßenzügen keine Radien von  $R < 250$  m zu verwenden.

KREBS/GLÖCKNER (1977) konnten den prinzipiellen Zusammenhang zwischen Kurvenradius und Verkehrssicherheit bestätigen. Sie stellten in ihren Untersuchungen fest, dass bei Radien von  $R < 100$  m der Anteil an Unfällen mit dem Gegenverkehr besonders hoch ist. Weiterhin wiesen Radien unterhalb von  $R = 200$  m etwa doppelt so hohe Unfallraten und Unfallkostenraten wie Kurven mit größeren Radien auf (vgl. Abb. 2-4). Ab Radien von  $R = 400$  m war kein Sicherheitsgewinn mehr zu erkennen.

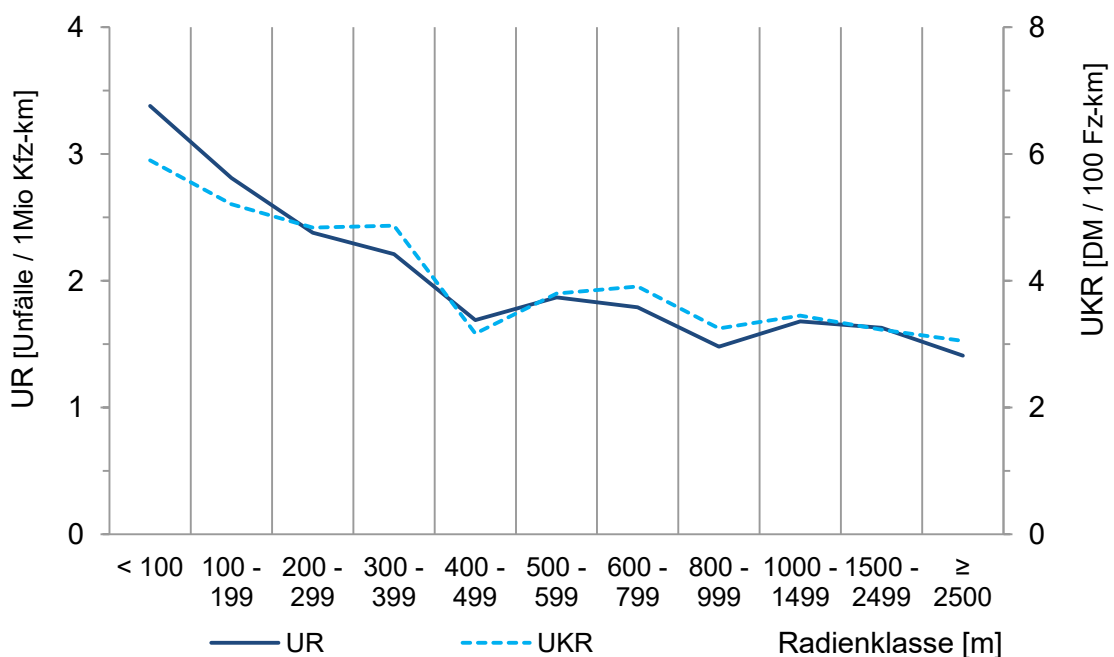


Abb. 2-4: Unfallrate und Unfallkostenrate in Abhängigkeit vom Kurvenradius nach KREBS/GLÖCKNER (1977)

Diese Ergebnisse wurden von KNOFLACHER U. A. (1979), LEUTZBACH/ZOELLMER (1989), LAMM U. A. (1999), HEGEWALD/WEBER (2008) und BÖSL/SPAHN (2010) bekräftigt. Auch hier haben sich Radien von  $R < 200$  m als kritisch erwiesen (vgl. z. B. Abb. 2-5). KNOFLACHER U. A. (1979) empfehlen daher bei Kurvenradien von  $R < 250$  m, den Kraftfahrer durch Geschwindigkeitsbegrenzungen auf diese Situationen hinzuweisen.

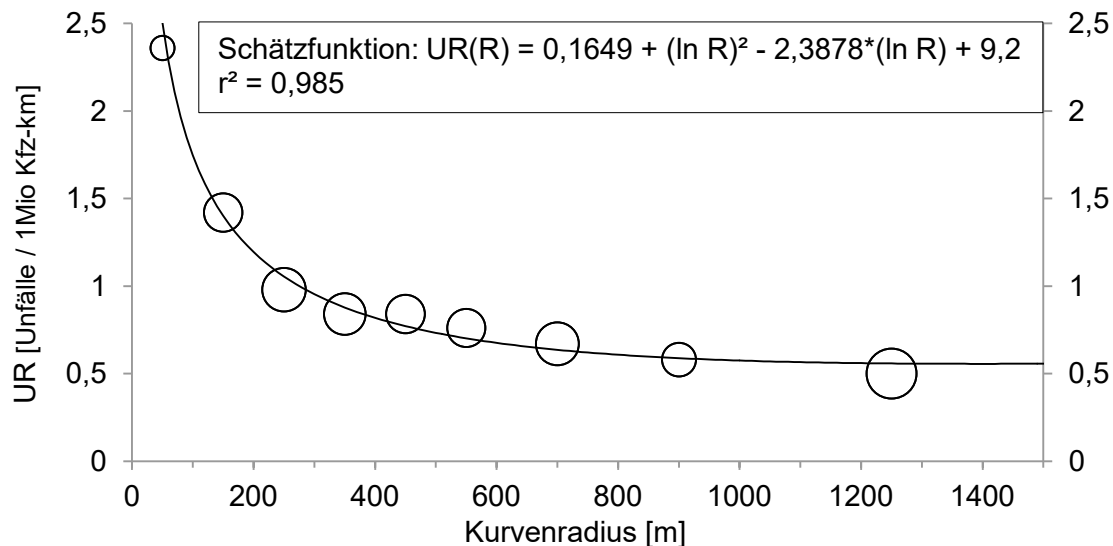


Abb. 2-5: Unfallrate in Abhängigkeit vom Kurvenradius, Unfalltypen 1 und 6 nach LEUTZBACH/ZOELLMER (1989)

EBERSBACH (2006) sieht Kurvenradien von  $R \leq 200$  m mit einer Länge von  $L \geq 50$  m als Singularität, bei denen die Kraftfahrer ihre Geschwindigkeiten aufgrund der Streckengeometrie deutlich anpassen. Bei kürzeren Kurven bzw. geringen Richtungsänderungswinkeln werden insbesondere bei diesen Radienbereichen durch das "Kurvenschneiden" erhebliche „Radiengewinne“ erzielt (vgl. auch KREBS H. G. 1973, KUPKE 1977, BÖHM 1997, SOSSOUMIHEN 2001 UND ZIMMERMANN/RIFFEL 2013). Die Radien können demnach nicht unabhängig von dem Richtungsänderungswinkel betrachtet werden.

DIETZE U. A. (2008) schätzen hingegen kleine Kurvenradien nur dann als kritisch ein, wenn daraus hohe Geschwindigkeitsanpassungen resultieren.

Verschiedene Untersuchungen belegen demnach den Einfluss der Größe der Kurvenradien auf die Verkehrssicherheit. So wurde mit zunehmendem Radius ein höheres Sicherheitsniveau festgestellt (vgl. KREBS/GLÖCKNER 1977, LEUTZBACH/ZOELLMER 1989, LAMM U. A. 1999, EBERSBACH 2006). Dabei haben sich vor allem Radien von  $R < 200$  m als kritisch erwiesen.

## Kurvigkeit

Die Kurvigkeit ist ein abstraktes Maß für einen Streckenabschnitt. Sie berechnet sich aus der Summe der Richtungsänderungen bezogen auf die Länge eines Abschnitts (FGSV 1995).

$$KU = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i}{L} \quad \text{Gl. 2-1}$$

KU	[gon/km]	Kurvigkeit
$\alpha_i$	[gon]	Richtungsänderung der i-ten Kurve
L	[km]	Länge des Streckenabschnitts

Die Kurvigkeit ist somit ein streckencharakteristischer Wert für die Trassierung im Lageplan. Die Güte der Linienführung im Lageplan kann allerdings anhand dieser Kenngröße nicht abgeschätzt werden, da sie weder etwas über die Größe einzelner Entwurfselemente noch über deren Stetigkeit (Elementrelationen) aussagt.

In der Literatur wird die Kurvigkeit vorrangig genutzt, um den Einfluss auf das Fahrverhalten zu beschreiben (vgl. z. B. KÖPPEL/BOCK 1970, TRAPP 1971, DILLING 1973, TRAPP/OELLERS 1974 UND KÖPPEL/BOCK 1979).

Unfalluntersuchungen zeigen hingegen keinen eindeutigen Zusammenhang mit der Verkehrssicherheit. Während KREBS/GLÖCKNER (1977) und LEUTZBACH/ZOELLNER (1989) einen leichten Anstieg der relevanten Unfallkenngrößen mit zunehmender Kurvigkeit erkennen, konnten BUTTERWEGGE (2001) und BRÄUNINGER (2007) diese Tendenz nicht bestätigen.

KREBS/GLÖCKNER (1977) stellten fest, dass mit steigender Kurvigkeit die Unfallrate und die Unfallkostenrate zunehmen (vgl. Abb. 2-6). Die Unterschiede der einzelnen Klassen sind jedoch gering. Erst bei sehr hohen Kurvigkeiten ( $KU > 500$  gon/km) sind wesentlich höhere Unfallkennzahlen festzustellen.

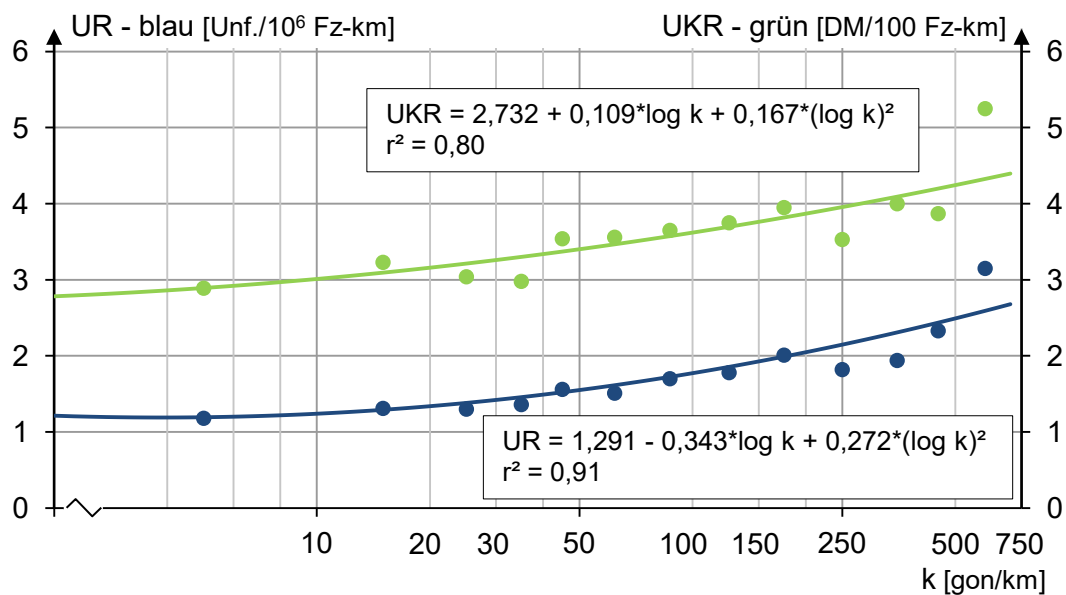


Abb. 2-6: Unfallrate und Unfallkostenrate als Funktion der Kurvigkeit nach KREBS/GLÖCKNER (1977)

Auch LEUTZBACH/ZOELLMER (1989) konnten einen leichten Anstieg der Unfallraten mit steigender Kurvigkeit feststellen. Der starke Anstieg der Unfallkenngrößen bei hohen Kurvigkeiten ( $KU > 500$  gon/km) wie bei KREBS/GLÖCKNER (1977) konnte allerdings nicht nachgewiesen werden.

BUTTERWEGGE (2001) verglich die Kurvigkeit von unfallauffälligen Strecken (Unfallhäufungslinien - UHL) mit (möglichst) benachbarten Strecken ohne auffälliges Unfallgeschehen (Vergleichsstrecken - VS). Die Streuungen der Kurvigkeiten waren in beiden Kollektiven (UHL und VS) ähnlich. Sie wiesen etwa zu gleichen Teilen geringe, mittlere und hohe Kurvigkeiten auf. Sie verzeichnete demnach keinen allgemeinen Zusammenhang zwischen Kurvigkeit und Verkehrssicherheit. BRÄUNINGER (2007) kam in ihren Sicherheitsuntersuchungen im Gebiet des ehemaligen SBA Meißen-Dresden zu derselben Feststellung.

LAMM U. A. (1999) untersuchten weiterhin die „Kurvigkeit des Einzelbogens“ als Parameter zur Beschreibung des Fahrverhaltens und des Unfallgeschehens. Sie berechnet sich aus der Winkeländerung im Lageplan bezogen auf die Länge der Kurve (Kreisbogen inkl. Übergangsbögen). Sie ist somit ein Maß für die Einzelkurve und berücksichtigt Richtungsänderungswinkel und Kurvenlänge. LAMM U. A. (1999) stellten insgesamt einen deutlichen Anstieg der Unfallkenngrößen mit zunehmender Kurvigkeit des Einzelbogens fest. Zwischen 200 gon/km und 800 gon/km nahmen sowohl die Unfallrate als auch die Unfallkostenrate um das Fünffache zu.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Kurvigkeit per Definition kein geeigneter Parameter ist, um die Güte der Linienführung im Lageplan einzuschätzen. LIPPOLD (1997) betont in seinen Fahrverhaltensuntersuchungen nochmals, dass die Kurvigkeit stets im Zusammenhang mit der Stetigkeit (Relationstrassierung) zu betrachten ist. Die Kenngröße „Kurvigkeit des Einzelbogens“ kann insbesondere im Bezug zur Kurvigkeit des Annäherungsbereichs (vgl. Ziffer 2.1.6) als Parameter für entwurfstechnische Bewertungen herangezogen werden.

### **Relationstrassierung**

Die Linienführung einer Straße soll u. a. ein gleichmäßiges Fahren ohne große Geschwindigkeitsdifferenzen ermöglichen. Dazu sind insbesondere die Elemente des Lageplans in ihrer Größe und Folge aufeinander abzustimmen.

Die Grundlagen zur Stetigkeit in der Folge von Kurvenradien sind auf die Untersuchungen von KÖPPEL/BOCK (1970) zurückzuführen. Sie ermittelten mittlere Radiengeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Kurvenradien. Auf dieser Grundlage und der Bedingung, dass sich Geschwindigkeitsdifferenzen bei Radienwechsel nur in einem gewissen Prozentsatz einstellen sollen, konnten zulässige Radiensprünge in S-Kurven berechnet werden. Anhand dieser Überlegungen wurde ein Diagramm für zulässige Radienfolgen entwickelt (vgl. Abb. 2-7). Dabei wurden folgende Zulässigkeitsbereiche für Radienfolgen festgelegt (KÖPPEL/BOCK 1970):

- sehr guter Bereich,
- guter Bereich,
- brauchbarer Bereich und
- zu vermeidender Bereich.

Das Diagramm wurde in dieser Form in die RAL-L-1 (FGSV 1973) und RAS-L-1 (FGSV 1984) übernommen.

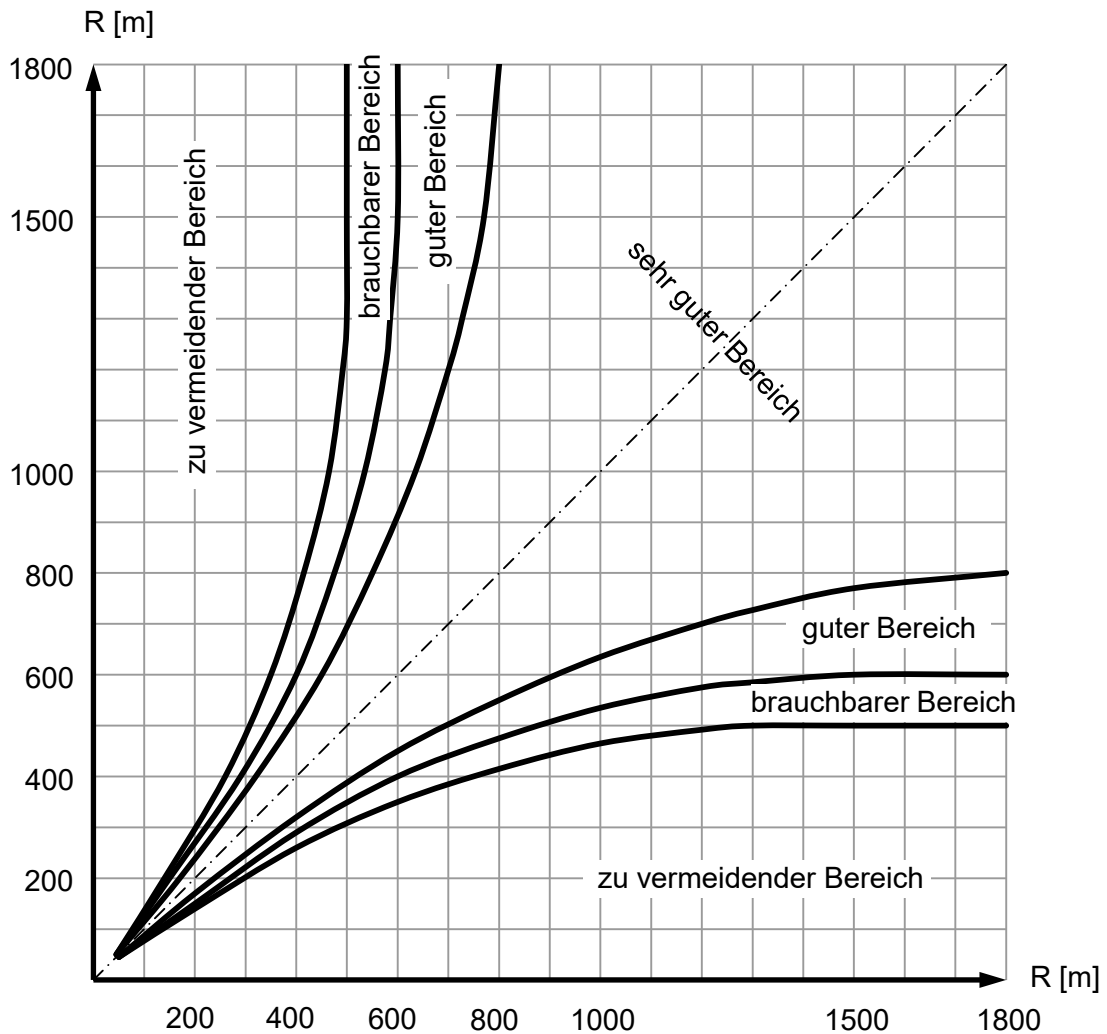


Abb. 2-7 Zulässige Radienfolgen nach KÖPPEL/BOCK (1970)

LABS (1986) stellte in ihrer Dissertation fest, dass unzureichende geometrische Parameter (z. B. kleine Radien, geringe Sichtweiten) nicht zwangsläufig zu erhöhten Beanspruchungen des Kraftfahrers führen, wenn diese in stetiger Folge angeordnet sind. Vielmehr waren bei Wechsel von angepassten und großzügigen Trassierungselementen ein ungleichmäßiges Fahrverhalten und damit erhöhte Beanspruchungswerte zu verzeichnen.

LEUTZBACH/ZOELLMER (1989) untersuchten das Unfallgeschehen in Elementfolgen. Sie ermittelten dazu die maßgebenden Unfallkenngrößen (Unfallrate und Unfallkostenrate) in Abhängigkeit vom Radienverhältnis (Division des betrachteten Kreisbogenradius durch den in Fahrtrichtung davorliegenden Kreisbogenradius). Die Auswertung „aller Radien“ (alle Kreisbögen, inkl. derer, denen ein Übergangsbogen oder eine Gerade vorausgeht) ergab erhöhte Unfallkenngrößen bei Verhältniswerten von  $\leq 0,15$  (vgl. Tab. 2-3). Mit zunehmendem Radienverhältnis (ab einem Verhältniswert von 0,25) war nur noch eine leicht fallende Tendenz der Unfallkenngrößen festzustellen. Den sprunghaften Anstieg der Unfallrate bei Verhältniswerten von  $< 0,2$  beobachteten auch LAMM U. A. (1999).

Die Begrenzung des Kollektivs auf „direkt aufeinanderfolgende Radien“ (unmittelbare Folge zweier Kreisbögen) sowie die differenzierte Betrachtung nach den Unfalltypen 1 und 6 konnten den oben beschriebenen Zusammenhang nicht weiter verdeutlichen.

Tab. 2-3: Unfallrate und Unfallkostenrate in Abhängigkeit vom Radienverhältnis (alle Unfalltypen) nach LEUTZBACH/ZOELLMER (1989)

Radien- verhältnis	alle Radien		direkt aufeinanderfolgende Radien	
	UR [U/10 <sup>6</sup> Fz*km]	UKR [DM/100 Fz*km]	UR [U/10 <sup>6</sup> Fz*km]	UKR [DM/100 Fz*km]
≤ 0,15	2,75	12,21	2,43	11,93
0,16 - 0,35	1,76	7,39	1,85	9,39
0,36 - 0,59	1,54	7,74	1,73	5,91
0,60 - 0,79	1,64	6,91	1,86	3,74
0,80 - 0,99	1,33	5,93	1,37	7,19
1,00 - 1,49	1,35	6,75	1,31	6,36
≥ 1,49	1,27	4,96	1,41	5,23

LEUTZBACH/ZOELLMER (1989) vermuteten weiterhin, dass sich ungünstige Radienfolgen bei geringen Fahrbahnbreiten stärker auf das Unfallgeschehen auswirken. Dies konnte in ihren Untersuchungen bestätigt werden. Sie begründeten den Zusammenhang durch den erhöhten seitlichen Bewegungsspielraum und das mögliche Kurvenschneiden bei breiteren Fahrstreifen. Die Ergebnisse von BRÄUNINGER (2007) bekräftigen diese Feststellungen. Es ist jedoch anzumerken, dass die sich hier als kritisch herausgestellten Radienverhältnisse weit außerhalb des zulässigen Bereichs nach dem Diagramm zur Abstimmung der Radienfolge der RAS-L-1 (FGSV 1984) liegen.

Darüber hinaus untersuchten LEUTZBACH/ZOELLMER (1989) die Elementfolgen Gerade - Kreisbogen bzw. Gerade - Klothoide - Kreisbogen. Die Ergebnisse zeigten einen deutlichen Sicherheitsgewinn mit zunehmendem Radius bis zu einer Größe von  $R = 200$  m. Oberhalb dieses Schwellenwertes konnten keine systematischen Zusammenhänge mehr erkannt werden. Dabei wies die Folge „Klothoide vor Radius“ im Bereich bis  $R = 200$  m niedrigere Werte in den Unfallkenngrößen auf als die Folge „Gerade vor Radius“. Diese These verdeutlicht den Beitrag von Klothoiden zur Verkehrssicherheit, insbesondere bei kleinen Radien.

LIPPOLD (1997) prüfte in seiner Dissertation die nach den RAS-L-1 (FGSV 1984) zulässigen Bereiche für Radienfolgen auf eine mögliche Erweiterung. Dazu nutzte er zunächst die Erkenntnisse aus den Geschwindigkeitsmessungen (Geschwindigkeitsdifferenzen in den Elementfolgen), um einen erweiterten zulässigen Bereich darzustellen. Anhand der ergänzenden Unfallanalyse schlussfolgerte LIPPOLD (1997) u. a. folgende drei Sachverhalte:

- Zwischen Radien von  $100 \text{ m} < R < 200 \text{ m}$  sind selbst geringe Erweiterungen nicht zu empfehlen.
- Im Bereich von  $200 \text{ m} < R < 300 \text{ m}$  sollte eine allmähliche Angleichung der bisher gültigen Relationen an den vorgeschlagenen erweiterten Bereich erfolgen.

- Bei Radien von  $R \geq 300$  m ist eine Erweiterung der Radienrelationen möglich. Die Unfälle liegen dort weit außerhalb des vorgeschlagenen Bereichs.

Auf dieser Grundlage wurde das Diagramm zur Abstimmung der Radienfolge („Relationstulpe“) abgeleitet, das inhaltlich in die RAS-L (FGSV 1995) und in die RAL (FGSV 2012a) übernommen wurde (vgl. Abb. 2-9).

Die Unfallhäufungen beim Übergang von Geraden auf Kreisbögen bestätigten weiterhin die bereits aus den Geschwindigkeitsdifferenzen resultierende Bedingung, Radien mit  $R < 200$  m nicht an (längere) Geraden anzuschließen. LIPPOLD (1997) empfiehlt letztlich folgende Kurvenmindestradien im Anschluss an Geraden, sofern sich aus der Entwurfsgeschwindigkeit  $V_e$  nicht größere Mindestradien ergeben (vgl. Tab. 2-4). Diese Richtwerte wurden in die RAS-L (FGSV 1995) übernommen.

Tab. 2-4: Kurvenmindestradien bei der Elementfolge G - A - R (LIPPOLD 1997)

Länge L [m] der Geraden	min R [m] des Kreisbogens
$L \geq 300$ m	min R $\geq 400$ m
$L < 300$ m	min R $> L$

KREBS H. (1970), BUTTERWEGGE (2001) und ZIMMERMANN/RIFFEL (2013) unterstreichen in ihren Untersuchungen nochmals die Zweckmäßigkeit der Relationstrassierung insbesondere bei kleineren Radienbereichen ( $R < 250$  m). ZIMMERMANN/RIFFEL (2013) konnten mit zunehmenden Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen der betrachteten und der zurückliegenden Kurve (bestimmt nach dem Verfahren der RAS-L (FGSV 1995) tendenziell steigende Unfallzahlen feststellen.

MAIER U. A. (2012) und BARK U. A. (2015) ermittelten in ihren Unfallwahrscheinlichkeitsmodellen zur Abschätzung der Sicherheitswirkung einzelner geometrischer Parameter ebenfalls einen engen Zusammenhang zwischen dem Unfallgeschehen und der Relationstrassierung. Die Kurven wurden anhand der Anforderungen der RAL (FGSV 2012a) hinsichtlich der Elementfolgen Kurve - Kurve (vgl. Abb. 2-9) und Gerade - Kurve (vgl. Abb. 2-10) richtungsgetreunt vierstufig bewertet:

- keine Abweichung,
- geringe Abweichung ( $0 \% < \text{Abw.} \leq 10 \%$ ),
- mittlere Abweichung ( $10 \% < \text{Abw.} \leq 20 \%$ ) und
- hohe Abweichung ( $\text{Abw.} > 20 \%$ ).

Das Maß der Abweichung berechnete sich dabei aus dem Verhältnis von dem vorhandenen zu dem erforderlichen Radius nach folgender Formel.

$$Abw = 1 - \frac{R_{vorh}}{R_{erf}} \quad \text{Gl. 2-2}$$

Abw	[-]	Maß der Abweichung
$R_{vorh}$	[m]	vorhandener Kurvenradius
$R_{erf}$	[m]	gemäß der RAL (FGSV 2012a) erforderlicher Kurvenradius

Die schlechteste Bewertung wurde als maßgebend erachtet und der entsprechenden Kurve zugeordnet. Die Anzahl der jeweiligen Abweichungen bezogen auf die



Abschnittslänge (sozusagen die Dichte der Lageplanelemente der jeweiligen Abweichungen) wurden als Einflussparameter geprüft. Dabei haben sich insbesondere die Elemente mit hohen (zum Teil auch mittleren) Abweichungen als signifikante Einflussgrößen herausgestellt.

### 2.1.3 Elemente des Höhenplans

#### Längsneigung

In der Literatur wird i. A. ein Einfluss der Längsneigung auf die Verkehrssicherheit beschrieben. Allerdings kommen die Autoren in ihren Untersuchungen quantitativ zu verschiedenen Ergebnissen.

BITZL (1964) konnte in seinen Untersuchungen auf Bundes- und Staatsstraßen einen engen Zusammenhang zwischen der Längsneigung und der Unfallhäufigkeit nachweisen. Ab Längsneigungen von  $s > 4 \%$  war ein sprunghafter Anstieg der Unfallziffer (Unfallrate) und des Gefahrengrads (entspricht in etwa der Unfallkostenrate) zu erkennen. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen von BÖSL/SPAHN (2010).

KREBS/GLÖCKNER (1977) und LEUTZBACH/ZOELLNER (1989) stellten hingegen fest, dass erst bei größeren Längsneigungen ( $s > 6 \%$ ) die Unfallrate und die Unfallkostenrate vergleichsweise hohe Werte annehmen.

HIERSCHE U. A. (1984) differenzierten in ihren Untersuchungen zum Einfluss der Längsneigung auf die Verkehrssicherheit in Gefälle- und Steigungsstrecken. Dabei wiesen insbesondere starke Gefällestrassen ( $s < -6 \%$ ) hohe Unfallraten und Unfallkostenraten auf. Steigungsstrecken waren hingegen eher als unkritisch zu bewerten. Die Autoren begründeten dies mit dem höheren Geschwindigkeitsniveau bei negativer Längsneigung. LAMM U. A. (1999) kamen zu ähnlichen Aussagen.

BARK U. A. (2015) konnten in ihrem Unfallhäufigkeitsmodell (nur Unfalltyp 1) für Gegenverkehrsunfälle (Unfallart 4) die negativen Auswirkungen von starken Gefällestrassen ( $s < -4 \%$ ), insbesondere in Überlagerung mit nicht relationstrassierten Streckenabschnitten, auf das Unfallgeschehen bestätigen.

#### Kuppen- und Wannenhalmmesser

LEVIN (1991) kam in seinen Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass die Verkehrsteilnehmer ihr Fahrverhalten nicht den vorhandenen Sichtverhältnissen anpassen. Zwar sank das Geschwindigkeitsniveau mit kleinerem Kuppenhalmmesser, allerdings nicht in dem Maße, wie aus der geometrischen Berechnung erforderlich wäre. Der Autor stellte weiterhin fest, dass sich auf Kuppen überdurchschnittlich viele Überholunfälle ereignen. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse sowie den ästhetischen Anforderungen und einem „Komfortkriterium“ entwickelte er ein Bemessungsverfahren für Kuppenhalmmesser in Abhängigkeit von der Entwurfsgeschwindigkeit. Die sich daraus ergebenden Mindestwerte liegen deutlich unterhalb der Grenzwerte für Kuppenhalmmesser der RAS-L (FGSV 1995). Außerdem sollten Kuppenhalmmesser entweder nahe am Mindestwert liegen oder ausreichende Überholsichtweiten gewährleisten, um gefährliche Überholvorgänge infolge falscher Einschätzung der Sichtweite zu vermeiden.

Für die Größe von Wannenhalmmessern definierte LEVIN (1991) aus den Kriterien Komfort und Ästhetik ebenfalls niedrigere Mindestwerte als in den RAS-L (FGSV 1995) angegeben.

### 2.1.4 Räumliche Linienführung

Bei der Überlagerung von Lageplanradien mit Höhenplanausrundungen können sogenannte sichtbare Radien (Abbildungsverzerrungen) berechnet werden. Die Abbildungsverzerrung  $Q$  berechnet sich aus dem Quotient des sichtbaren Radius zu dem Lageplanradius. ENGELKE (1990) empfiehlt für die Trassierung von Landstraßen den Wert von  $Q = 2,0$  bei Wannen und  $Q = 0,5$  bei Kuppen nicht zu über- bzw. unterschreiten.

APPELT (1998) untersuchte den Einfluss von sichtbaren Radien auf das Fahrverhalten und das Unfallgeschehen. Es zeigte sich, dass die sichtbaren Radien das Geschwindigkeitsverhalten der Kraftfahrer statistisch besser beschreiben, als die in die fahrdynamische Bemessung der Kurven eingehenden Lageplanradien. Als Ergebnis der Unfallauswertung definierte APPELT (1998) letztlich die in Tab. 2-5 aufgeführten zulässigen Bereiche für Abbildungsverzerrungen. Allerdings stellen diese Werte aufgrund der geringen Datenbasis keine verallgemeinerungsfähigen Sicherheitsgrenzen dar.

Tab. 2-5: Zulässige Bereiche für Abbildungsverzerrungen nach APPELT (1998)

Bereich	Abbildungsverzerrung $Q$ bei Kuppen	Abbildungsverzerrung $Q$ bei Wannen
guter Bereich	$Q \geq 0,75$	$Q \leq 1,25$
brauchbarer Bereich	$0,5 \leq Q < 0,75$	$1,25 < Q \leq 1,5$
zu vermeidender Bereich	$Q < 0,5$	$Q > 1,5$

WEISE U. A. (2002) prüften u. a. den Zusammenhang zwischen den Raumelementen und dem Unfallgeschehen. Kurven mit Höhenplanausrundungen waren bei bestimmten Parameterkombinationen durch ein höheres Unfallniveau gekennzeichnet. Allgemeine Zusammenhänge oder Grenzwerte der Abbildungsverzerrung  $Q$  konnten allerdings nicht abgeleitet werden.

ZIMMERMANN U. A. (2007) versuchten die Parameter insbesondere der sicherheitskritischen Defizite der räumlichen Linienführung durch Fahrverhaltens- und Unfalluntersuchungen genauer zu quantifizieren. Zur Vermeidung verdeckter Kurvenbeginne forderten sie für Klothoidenparameter bis  $A = 300$  m eine Einsehbarkeit der Richtungsänderung von  $3,5$  gon aus einer Entfernung von  $75$  m vor Kurvenbeginn. Bei größeren Klothoidenparametern ( $A > 300$  m) reicht eine einsehbare Klothoidenlänge von  $100$  m aus. Sichtverzerrungen in Wannenkurven (Dehnungen) sollten den Wert  $Q = 1,17$  nicht überschreiten, was einem Verhältnis von Lageplanradius zu Höhenplanhalbmesser  $R/H = 1/10$  entspricht. Sichtschattenstrecken werden als kritisch erachtet, wenn eine Sichtschattentiefe von  $0,75$  m über eine Fahrstrecke von  $60$  m (drei Stationsbereiche der Untersuchung) vorhanden ist (ZIMMERMANN U. A. 2007). Diese Festlegungen wurden qualitativ (größtenteils auch quantitativ) in die RAL (FGSV 2012a) übernommen.

KOTSCH (2012) und IFFERT (2013) nutzten die Welligkeit<sup>3</sup> als Indikator für den Nachweis von Defiziten der räumlichen Linienführung. Sie stellten fest, dass zwar die

<sup>3</sup> Die Welligkeit beschreibt die Richtungsänderung im Höhenplan bezogen auf die Abschnittslänge (gon/km).

durchschnittliche Anzahl der kritischen Bereiche mit zunehmender Welligkeit steigt, jedoch auch schon bei sehr kleinen Welligkeiten Sichtdefizite (kritische Sichtschattenbereiche und verdeckte Kurvenbeginne) auftreten können. Die anschließende Unfallanalyse von IFFERT (2013) ergab, dass sich ca. 70 % der Unfälle im Längsverkehr (Unfalltyp 6) in Bereichen mit Sichtdefiziten ereigneten, was den negativen Einfluss der genannten Defizite der räumlichen Linienführung auf die Verkehrssicherheit unterstreicht. Ein genereller Zusammenhang zwischen der Welligkeit und dem Unfallgeschehen konnte allerdings nicht hergestellt werden. BUTTERWEGGE (2001) kam in ihren Untersuchungen zu der gleichen Erkenntnis.

Bei ungünstiger Überlagerung von Lage- und Höhenplanelementen kann es zu entwässerungsschwachen Zonen kommen. Erste Untersuchungen auf Autobahnen unterstreichen die Bedeutung, entwässerungsschwachen Zonen zu vermeiden (vgl. LIPPOLD U. A. 2011c und LIPPOLD U. A. 2016). Auf Landstraßen ist dies allerdings noch nicht als allgemeines Problem bekannt.

### 2.1.5 Sichtweite

Der Sichtweite wird in der Literatur ein Einfluss auf die Verkehrssicherheit und das Fahrverhalten zugesprochen.

KREBS/GLÖCKNER (1977) und LAMM U. A. (1999) kamen zu dem Ergebnis, dass die Sichtweite einen Einfluss auf das Unfallrisiko hat. Mit steigender Sichtweite nahmen die Unfallrate und die Unfallkostenrate ab. Insbesondere bei geringen Sichtweiten von  $SW < 100$  m waren vergleichsweise hohe Unfallraten zu verzeichnen. Bei differenzierter Betrachtung nach den Unfalltypen 1 und 6 war festzustellen, dass die Sichtweite nur einen geringen Einfluss auf Unfälle im Längsverkehr (Unfalltyp 6) hat. Der Sicherheitsgewinn war hauptsächlich auf den Rückgang der Fahrurfälle zurückzuführen (KREBS/GLÖCKNER 1977).

Sichtweitensprünge hinter Unstetigkeitsstellen führen nach JACKWITZ (1996) zu erhöhten Beanspruchungen der Kraftfahrer. Dies wurde durch die Wahl geringerer Geschwindigkeiten kompensiert. Allerdings konnte kein statistisch gesicherter Zusammenhang zwischen der Sichtweite und der Perzentilgeschwindigkeit  $V_{85}$  gefunden werden. JACKWITZ (1996) merkte daher an, dass weiterhin andere geometrische Parameter (z. B. die Kurvigkeit) das Fahrverhalten beeinflussen.

SCHULZ (2012) wertete anhand von Probandenfahrten (Realfahrten zum Teil mit Nebenaufgabe) und Versuchen im Fahrsimulator das Blickverhalten und die Fahrerreaktionen in Abhängigkeit von der Sichtweite aus. Als Obergrenze sichtweitenbezogener Reaktionen stellte sich der Wert  $SW = 250$  m heraus (bei Geschwindigkeiten von bis zu 110 km/h). Ab Sichtweiten von 200 m konzentrierte sich der Fahrer vermehrt auf die Straße. Bei Sichtweiten unterhalb von 150 m waren abrupte Reaktionen festzustellen.

Tab. 2-6: Orientierungssichtweite in Abhängigkeit von der Perzentilgeschwindigkeit  $V_{85}$  (SCHULZ 2012)

Geschwindigkeit $V_{85}$ [km/h]	70	80	90	100	110
Orientierungssichtweite $S_o$ [m]	nicht erforderlich	180	200	220	250

SCHULZ (2012) leitete aus seinen Ergebnissen die Orientierungssichtweite (abhängig von der Geschwindigkeit  $V_{85}$ ) ab, die es dem Fahrer erlaubt, die Streckencharakteristik zu erfassen und sein Fahrverhalten ohne erhöhte Beanspruchungen anzupassen.

In den RAL (FGSV 2012a) wird daher empfohlen, zur rechtzeitigen Orientierung erhöhte Sichtweiten (30 % über der erforderlichen Haltesichtweite) auf dem überwiegenden Teil der Strecke zu gewährleisten.

### 2.1.6 Verfahren zur entwurfstechnischen Bewertung von Straßen

Die Arbeit hat u. a. zum Ziel, ein geeignetes Verfahren zur entwurfstechnischen Bewertung von Straßennetzen zu entwickeln. Daher werden bei den folgenden Literaturlauswertungen nicht nur die Ergebnisse diskutiert, sondern zum Teil auch die jeweiligen Untersuchungsmethoden dargestellt.

TRAPP/OELLERS (1974) erachteten die Ungleichförmigkeit des Geschwindigkeitsverhaltens als Beurteilungsmaß für den Sicherheitsgrad von Straßen. Eine Streuung von mehr als  $\pm 10$  km/h um den Streckenmittelwert sei nicht zu empfehlen. Dabei unterstellen TRAPP/OELLERS (1974) der Kurvigkeit bzw. der Änderung der Kurvigkeit einen maßgebenden Einfluss auf die Gleichförmigkeit des Fahrverhaltens.

LEUTNER (1974) ermittelte den "optischen Fahrwiderstand" (Adaptionsniveau) bzw. das reziproke Adaptionsniveau als gleitenden Mittelwert für maximal 75 m einsehbaren Straßenraum im Voraus und der zuletzt zurückgelegten Strecke von 100 m, um das Geschwindigkeitsverhalten von Kraftfahrern abzuschätzen. Der "optische Fahrwiderstand" verdeutlicht die sich für den Kraftfahrer ändernde Perspektivbildwirkung des überschaubaren Fahrraums und ergibt sich aus dem gleitenden Mittelwert der aus den Krümmungen resultierenden Winkelspektren (SCHLICHTER 1985). Die Kennwerte des reziproken Adaptionsniveaus zeigten insgesamt gute Übereinstimmungen mit den Grenzprofilen der Geschwindigkeiten.

KUPKE (1977) deutete einen Sicherheitsfaktor  $k$  aus dem Verhältnis der minimalen mittleren Kurvengeschwindigkeit zur maximalen mittleren Geschwindigkeit vor dem Geschwindigkeitseinbruch und definierte folgende Bereiche:

- $0,8 \leq k \leq 1,0$ : sicher,
- $0,6 \leq k < 0,8$ : gefährlich und
- $0,0 \leq k < 0,6$ : sehr gefährlich.

Der Verhältniswert berücksichtigt allerdings nicht das absolute Maß der Geschwindigkeitsverringerng (SOSSOUMIHEN 2001).

DIETRICH/SPACEK (1977) empfehlen, die Merkmale der Straßenverkehrsanlage mit den Anforderungen der Neubau-Richtlinien zu vergleichen. Die einzelnen Parameter sollten in ihrer Ausprägung dem angestrebten Sicherheitsniveau (abhängig von den vorhandenen Mitteln, Bedeutung der Straße und weiteren Randbedingungen) entsprechen. Streuungen (auch nach oben) sind nicht wünschenswert (Homogenität des Sicherheitsniveaus).

AL-KASSAR U. A. (1981) versuchten die Momentangeschwindigkeit freifahrender Pkw anhand von Streckenmerkmalen abzuschätzen. Dabei haben sich die Kurvigkeit und die Fahrbahnbreite als Einflussgrößen herausgestellt. Allerdings war das abgeleitete Modell nicht geeignet, um Momentangeschwindigkeiten an definierten Messquerschnitten hinreichend genau zu bestimmen. Neben nicht erfassten Merkmalen begründeten

AL-KASSAR U. A. (1981) diese Unschärfe mit dem nicht berücksichtigten Einfluss von der Abfolge und der Kombination von Streckenmerkmalen auf die Wahl der Momentangeschwindigkeit.

OSTERLOH (1983) erweiterte die Abbildungsverzerrung Q zu einem Risikofaktor S nach Gl. 2-3. Hintergrund seiner Überlegungen ist die unterschiedliche Sicherheitswirkung kleinerer bzw. größerer Radien bei gleichen Verhältniswerten Q. Als Grenzwert schlägt er einen Risikofaktor von  $S = 1,75$  vor.

$$S = \left( \frac{\log R_s}{\log R_g} \right)^6 \quad \text{Gl. 2-3}$$

S	[-]	Risikofaktor
$R_s$	[m]	sichtbarer Radius
$R_g$	[m]	Lageplanradius

LABS (1986) teilte Landstraßen anhand der Kurvigkeit und der mittleren Längsneigung in die in Abb. 2-8 aufgeführten Schwierigkeitsniveaus ein. GEIGENMÜLLER (1996) merkte dazu an, dass dieses Verfahren kritische Bereiche nur bedingt abbildet. In ihren Untersuchungen zu Abhängigkeiten zwischen Beanspruchung, Streckencharakteristik und Geschwindigkeit ergaben sich unterschiedliche Unfallraten bei gleichen Schwierigkeitsgraden.

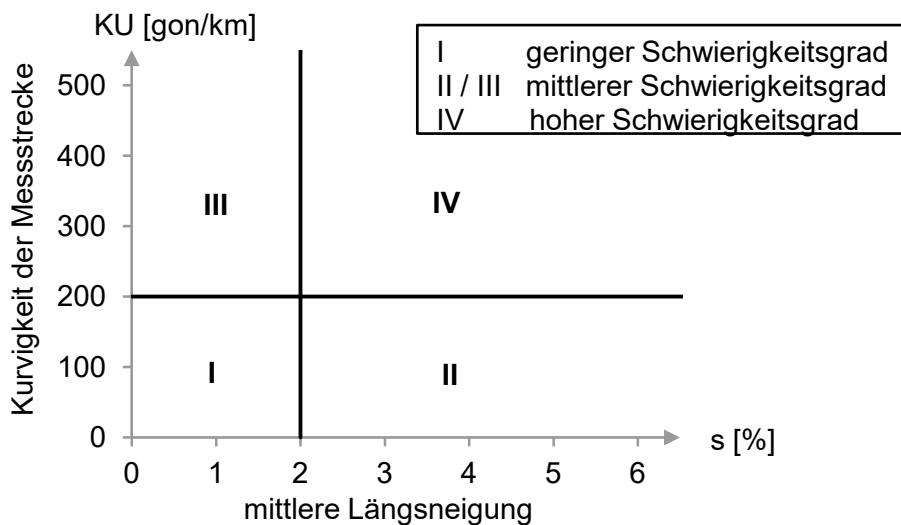


Abb. 2-8: Einstufungsschema für Landstraßen nach LABS (1986)

SCHNEIDER (1986) nutzte die Ungleichförmigkeit und die absolute Höhe von Geschwindigkeiten, um die Güte der Linienführung von Landstraßen zu beurteilen. Die Ungleichförmigkeit des Geschwindigkeitsniveaus beschreibt er durch den "Verkehrssicherheitskoeffizienten" (Verhältnis der Geschwindigkeit an einem lokalen Minimum zur mittleren Geschwindigkeit des davorliegenden Streckenabschnitts - vgl. KUPKE 1977) und dem Maß der Verzögerungen vor einem lokalen Geschwindigkeitsminimum. Die Geschwindigkeiten wurden über einen Algorithmus (EDV-Programm BELIN) ermittelt, der die Merkmale Kurvenradius, Richtungsänderungswinkel, Fahrbahnbreite und Längsneigung berücksichtigt. SCHNEIDER (1986) betont abschließend, dass Fahrbahnbreiten von  $B \leq 5,50$  m und Radien von  $R < 200$  m generell als kritisch anzusehen sind, auch wenn ihre Kombination zu gleichförmigen Geschwindigkeitsprofilen führt.

BUCK (1992) schätzte die Geschwindigkeit ( $V_{15}$ ,  $V_{50}$ ,  $V_{85}$ ) freifahrender Pkw anhand der Merkmale Krümmung, vorhandene Sichtweite und Längsneigung. Die Zusammenhänge wurden anhand multipler Regressionsrechnungen von realen Geschwindigkeitsprofilen (4 Messstrecken - ca. 2.300 Messkilometer) abgeleitet. Dabei hatten nur Kurvenradien von  $R < 500$  m, geringe vorhandene Sichtweiten ( $SW < 150$  m) und Längsneigungen von  $|s| > 2\%$  einen Einfluss auf das lokale Geschwindigkeitsverhalten. Insgesamt hält BUCK (1992) fest, dass lokale Geschwindigkeiten nicht nur anhand von Merkmalen eines Querschnitts abgeschätzt werden können. Die Wirkung der (zurückliegenden) Streckencharakteristik beeinflusst ebenfalls die Geschwindigkeitswahl. Deshalb berücksichtigt BUCK (1992) neben den Querschnittswerten auch gewichtete Mittelwerte der drei Merkmale auf einer zurückliegenden Streckenlänge von  $L = 400$  m. Die vorhandene Sichtweite ergab hier, anders als bei vergleichbaren Untersuchungen, keine direkte Abhängigkeit von der Krümmung.

LAMM U. A. (1992) definierten zur entwurfstechnischen Sicherheitsbeurteilung von Straßen folgende Kriterien:

- Sicherheitskriterium I: Stetigkeit der horizontalen Linienführung,
- Sicherheitskriterium II: Abstimmung zwischen  $V_e$  und  $V_{85}$  und
- Sicherheitskriterium III: fahrdynamische Sicherheit.

Das erste Kriterium untersucht die Güte von Elementfolgen (Gerade - Kurve und Kurve - Kurve) anhand von Geschwindigkeitsdifferenzen ( $\Delta V_{85}$ ). Die Geschwindigkeiten in den jeweiligen Elementen können in Abhängigkeit von der Kurvigkeit des Einzelbogens über Nomogramme abgelesen werden. Das zweite Kriterium prüft, ob die tatsächlich gefahrenen bzw. zu erwartenden Geschwindigkeiten  $V_{85}$  mit dem der Straße zu Grunde liegenden Entwurfsgeschwindigkeiten  $V_e$  harmonisieren. Das dritte Kriterium bewertet die Differenz ( $\Delta f_R$ ) aus den theoretisch vorausgesetzten (entsprechend der Richtlinien) und den tatsächlich in Anspruch genommenen radialen Kraftschlussbeiwerten. Die Sicherheitskriterien werden hinsichtlich ihrer „Entwurfsqualität“ mittels der in Tab. 2-7 aufgeführten Grenzwerte dreistufig eingeteilt.

Tab. 2-7: Klassifizierung der Sicherheitskriterien nach LAMM U. A. (1992)

Entwurfsqualität	Sicherheitskriterium I [km/h]	Sicherheitskriterium II [km/h]	Sicherheitskriterium III [-]
guter Entwurf	$\Delta V_{85} \leq 10$	$V_{85} - V_e \leq 10$	$\Delta f_R \geq +0,02$
fairer Entwurf	$10 < \Delta V_{85} \leq 20$	$10 < V_{85} - V_e \leq 20$	$-0,02 \leq \Delta f_R < +0,02$
schlechter Entwurf	$\Delta V_{85} > 20$	$V_{85} - V_e > 20$	$\Delta f_R < -0,02$

Zur Gesamtbewertung werden die einzelnen Kriterien zu einem „Sicherheitsmodul“ zusammengefasst und in gute, faire und schlechte Entwürfe klassifiziert (vgl. Tab. 2-8).

Die praktische Überprüfung dieses Verfahrens von GEIGENMÜLLER (1996) zeigte, dass der theoretische Ansatz zumeist gleiche oder schlechtere Bewertungen liefert als die Praxis. Die Unstimmigkeiten führte sie auf nichtberücksichtigte Einflussgrößen des Höhenplans und der Sicht zurück.

Tab. 2-8: Klassifizierungssystem des Sicherheitsmoduls nach LAMM U. A. (1992)

Klassifizierung des Sicherheitsmoduls	Bewertungskombinationen nach den Sicherheitskriterien I bis III
guter Entwurf	3x gut 2x gut / 1x fair 2x gut / 1x schlecht
fairer Entwurf	3x fair 2x fair / 1x gut 2x fair / 1x schlecht 1x gut / 1x fair / 1x schlecht
schlechter Entwurf	3x schlecht 2x schlecht / 1x gut 2x schlecht / 1x fair

GEIGENMÜLLER (1996) kombinierte zur Bewertung von Straßenverkehrsanlagen geometrische (die Kurvigkeit des Einzelbogens), fahrdynamische (die mittlere Geschwindigkeit im Kreisbogen) und psychophysiologische (die Beanspruchung in Form des Hautleitwertes<sup>4</sup>) Parameter. Dabei ist zu erkennen, dass mit zunehmender Geschwindigkeit und höherer Kurvigkeit des Einzelbogens der Kraftfahrer mehr beansprucht wird. Sie begründete dies mit den aus den Unstetigkeitsstellen resultierenden abrupten Geschwindigkeitsveränderungen, welche wiederum zu einem Anstieg der Aktivierung (hohe Hautleitwerte) führen. Die Regressionsrechnungen lieferten allerdings keine statistisch gesicherten Zusammenhänge.

WILKE (1996) versuchte, das Geschwindigkeitsverhalten von Kraftfahrern auf unstetigen Außerortsstraßen anhand der Parameter Kurvigkeit, Sichtweite und Fahrbahnbreite abzuschätzen. Allerdings brachte die Regressionsrechnung keinen verallgemeinerungsfähigen Ansatz.

BÖHM (1997) bewertete die Qualität von Streckenabschnitten anhand folgender Merkmalsgrößen:

- Kurvigkeit im Lageplan,
- Radienrelation,
- Querneigung,
- Längsneigung,
- Kuppen- und Wannenhalmmesser,
- Kurvigkeit im Höhenplan (Welligkeit),
- Haltesichtweite,
- Überholmöglichkeit und Fahrstreifenbreite.

Die einzelnen Kriterien (mit unterschiedlichen Dimensionen) überführte er dazu in eine Notenskala (1 bis 5). Als Maßstab setzte er vorwiegend die Anforderungen der damals gültigen RAS-L (FGSV 1995) und RAS-Q (FGSV 1996) an. Die einzelnen Teilnoten wurden über Wichtungsfaktoren zu einer Gesamtnote als Maß der Streckenqualität zusammengefasst.

<sup>4</sup> Der Hautleitwert ist die elektrische Leitfähigkeit der Haut, die meist als umgekehrter Hautwiderstand zwischen zwei auf der Haut platzierten Elektroden gemessen wird. Sie hängt von der Hautdurchfeuchtung (Schwitzen) und der Hautdurchblutung ab (<https://spektrum.de>).

LAMM U. A. (1999) schlagen zur Identifizierung gefährlicher Streckenabschnitte vor, Kurven nach der Kurvigkeit des Einzelbogens zu klassifizieren:

- guter Entwurf:  $KU_E \leq 180 \text{ gon/km}$ ,
- brauchbarer Entwurf:  $180 \text{ gon/km} < KU_E \leq 360 \text{ gon/km}$  und
- schlechter Entwurf:  $KU_E > 360 \text{ gon/km}$ .

Die Grenzwerte wurden anhand der Ergebnisse von Unfalluntersuchungen aus den USA und Deutschland abgeleitet.

SPACEK (1999) untersuchte das Spurverhalten in Landstraßenkurven. Er erkannte erhöhte Unfallzahlen bei den unerwünschten Spurtypen "Korrigieren", "Schneiden", "Ausholen" und "Hinaustragen". Bei welchen geometrischen Randbedingungen sich das jeweilige Spurverhalten einstellte, wurde allerdings nicht genauer thematisiert.

BODEN (2000) teilte Straßen der Kategorie A hinsichtlich ihrer räumlichen Linienführung in

- gute räumliche Linienführung,
- brauchbare räumliche Linienführung und
- schlechte räumliche Linienführung

ein. Dabei wurden Kriterien der Sicht, der Elementlängen und -relationen im Lageplan sowie der Abbildungsverzerrungen berücksichtigt. Als Bewertungsgrundlage wurden wie bei BÖHM (1997) hauptsächlich die derzeit gültigen Richtlinien herangezogen.

BAKABA (2001) typisierte Streckenabschnitte nach der Kurvigkeit, der Welligkeit und der Fahrbahnbreite in insgesamt 14 Klassen (Tab. 2-9). Die Sichtweite als Merkmal der räumlichen Linienführung wurde angesichts der Korrelation mit der Kurvigkeit nicht berücksichtigt (vgl. dazu auch TRAPP 1971, TRAPP/OELLERS 1974, KÖPPEL/BOCK 1979, AL-KASSAR U. A. 1981 und DURTH U. A. 1983). Weitere Merkmale (z. B. die mittlere gewichtete Längsneigung) sowie eine detaillierte Differenzierung der Merkmale verwarf BAKABA (2001) aufgrund geringer Besetzungsgrade bzw. der Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen.

Tab. 2-9: Streckentypisierung nach BAKABA (2001)

Lageplan Kurvigkeit [gon/km]	Höhenplan Welligkeit [gon/km]	Querschnitt Fahrbahnbreite	
		≤ 6,00 m	> 6,00 m
KU ≤ 75	≤ 15	1.1.a	1.1.b
	> 15	1.2.a	1.2.b
75 < KU ≤ 150	≤ 15	2.1.a	2.1.b
	> 15	2.2.a	2.2.b
150 < KU ≤ 225	≤ 15	3.1.a	3.1.b
	> 15	3.2.a	3.2.b
225 < KU ≤ 300		4	
KU > 300		5	



Diese Einteilung stellt nach BAKABA (2001) ein Ordnungssystem dar, mit der die typischen Ausprägungsformen der Streckencharakteristik abgebildet werden können. Seinem Verfahren zur Abschätzung von Fahrgeschwindigkeiten liegt diese Streckentypisierung zugrunde. "Homogene Abschnitte" wurden dabei anhand der Kurvigkeitsänderung ( $\Delta KU \geq 50 \text{ gon/km}$ ) und nicht relationstrassierten Abschnitten abgegrenzt. Die damit berechneten Geschwindigkeitsverläufe entsprachen zwar nicht gänzlich den gemessenen Geschwindigkeiten (mittlere Differenz zwischen den gemessenen und berechneten Fahrgeschwindigkeiten  $\Delta V = 5 \text{ km/h}$ ), allerdings beschreibt diese Methode die realen Fahrgeschwindigkeiten besser als das Verfahren nach den RAS-L (FGSV 1995). SCHMID (2004) stellte fest, dass die Methode nach BAKABA (2001) zur Abschätzung der Geschwindigkeit bei sehr kleinen Radien zu hohe Kurvengeschwindigkeiten veranschlagt und empfiehlt, diese entsprechend anzupassen.

SOSSOUMIHEN (2001) beurteilte die Fahrsicherheit eines Streckenabschnitts anhand folgender Kenngrößen:

- vorhandene Streckencharakteristik (Stetigkeit im Lageplan),
- Wahrnehmung der Streckencharakteristik (Abbildungsverzerrung),
- Fahrverhalten (Geschwindigkeits- und Spurverhalten) und
- Fahrdynamik (Kraftschlussausnutzung).

Dazu definierte er Zielerreichungsgrade (Sicherheitsteilnoten) für die jeweiligen Kriterien. Diese Skala wird durch zwei Grenzwerte eingeschränkt. Der obere Grenzwert (Grenze der Hinnehmbarkeit) beschreibt das Niveau, bei dessen Überschreitung kein zusätzlicher Sicherheitsgewinn zu erwarten ist. Der untere Grenzwert (Grenze der Zumutbarkeit) legt die Schwelle fest, bei dessen Unterschreitung die Verkehrssicherheit als nicht mehr gegeben erscheint. Zwischen diesen Grenzwerten wird ein linearer Verlauf des Zielerreichungsgrades festgelegt (SOSSOUMIHEN 2001). Die einzelnen Teilwerte wurden anteilmäßig erfasst und zu einem Ebenenwert (streckenspezifischer Wert des entsprechenden Kriteriums) zusammengezogen. Die Überlagerung der Ergebnisse dieser Bewertungsmethode mit dem Unfallgeschehen ergab zwar leichte Tendenzen. Ein deutlicher Zusammenhang zwischen den Unfallkenngrößen und den guten (Sicherheitsteilwert  $\geq$  obere Grenze), brauchbaren (untere Grenze  $<$  Sicherheitsteilwert  $<$  obere Grenze) und zu vermeidenden Bereich (Sicherheitsteilwert  $\leq$  untere Grenze) der entsprechenden Kriterien konnte allerdings nicht nachgewiesen werden. Zusammengefasste Gesamt- oder Ebenenwerte sind daher nur für Sicherheitsvergleiche oder Rangfolgenbildungen dienlich. Das Detektieren von Sicherheitsdefiziten sollte anhand der Einzelwerte erfolgen (SOSSOUMIHEN 2001).

PATZAK (2002) stellte bei seinen Untersuchungen fest, dass das Fahrverhalten auf Streckenabschnitten ähnlicher Charakteristik (vergleichbare Kurvigkeit) primär durch die Kurvigkeit beeinflusst wird. Bei Singularitäten (Unstetigkeitsstellen) treten der Kurvenradius und der Richtungsänderungswinkel als maßgebende Parameter für die Geschwindigkeitswahl in den Vordergrund.

STEYER (2004) schätzte die Stetigkeit von Kurven ähnlich wie SOSSOUMIHEN (2001) über Kurvigkeitsdifferenzen  $\Delta KU$  ein. Dieser Wert ergibt sich nach STEYER (2004) aus der Differenz der mittleren gewichteten Kurvigkeit (streckencharakteristischer Parameter des Annäherungsbereichs) zu der Kurvigkeit des Einzelbogens. Die Kurvigkeitsdifferenzen  $\Delta KU$  teilte er in die drei Klassen

- $\Delta KU \leq 200$  gon/km (stetiger Streckenabschnitt mit geringen Geschwindigkeitsdifferenzen von  $\Delta V < 12,5$  km/h zwischen dem Annäherungs- und Kurvenbereich),
- $200 < \Delta KU \leq 400$  gon/km (Geschwindigkeitsdifferenzen von  $\Delta V < 25$  km/h) und
- $\Delta KU > 400$  gon/km (Unstetigkeitsstellen in der Linienführung mit Geschwindigkeitsdifferenzen von  $\Delta V > 25$  km/h)

und ermittelte dazu jährliche Unfallkosten in Abhängigkeit von der Abbildungsverzerrung  $Q$  (differenziert nach Wanne, Kuppe und ebene Kurve). Anhand der Ergebnisse bildete er drei Kurvenkategorien:

- Kategorie I: gute Kurvengeometrie ( $UK < 60.000$  DM/a),
- Kategorie II: kritische Kurvengeometrie ( $60.000 \leq UK < 100.000$  DM/a) und
- Kategorie III: gefährliche Kurvengeometrie ( $UK > 100.000$  DM/a).

Insgesamt hält STEYER (2004) fest, dass gute geometrische Entwürfe (Kategorie I) nur bei stetigen Trassierungen (Kurvigkeitsdifferenz von  $\Delta KU \leq 200$  gon/km) zu erreichen sind. Bei Wannenkümmen sollte zudem die Abbildungsverzerrung  $Q \leq 1,2$  betragen. Stetige Kuppenkrümmen waren hingegen unabhängig von der Abbildungsverzerrung immer unproblematisch. Dehnungen (Abbildungsverzerrung von  $Q > 1$ ) sind demnach kritischer zu bewerten als Stauchungen (Abbildungsverzerrung von  $Q < 1$ ).

Der Einfluss der mittleren gewichteten Kurvigkeit des Annäherungsbereiches auf die Geschwindigkeitswahl der anschließenden Kurve wurde durch EBERSBACH (2006) bestätigt.

ZIMMERMANN/RIFFEL (2013) nannten in ihren Untersuchungen zum Spurverhalten den Radius, die Radiuslänge und die Fahrstreifenbreite als maßgebende Einflussgrößen auf die Fahrspurwahl. Die Fahrzeugführer bei den Probandenfahrten zeichneten sich hier durch eine vorausschauende Fahrweise aus (geringe Geschwindigkeitskorrekturen vor Kurven). Nennenswerte Geschwindigkeitsanpassungen traten erst bei Kurvenradien von  $R < 250$  m auf. Kritische Reaktionen im Spur- und Geschwindigkeitsverhalten waren nur bei Elementfolgen festzustellen, die außerhalb der zulässigen Bereiche nach den RAL (FGSV 2012a) liegen.

### 2.1.7 Schlussfolgerungen für die Untersuchung

Der Einfluss bestimmter Entwurfsmerkmale auf die Verkehrssicherheit konnte in verschiedenen Untersuchungen nachgewiesen werden. Dabei ist zu beachten, dass die Erkenntnisse aus der Literatur zum Teil auf älteren Untersuchungen beruhen. Ihre Gültigkeit bzw. die Übertragbarkeit auf das heutige Fahrzeugkollektiv ist zu prüfen.

Schmale Fahrbahnen ( $B \leq 6,00$  m) erhöhen das Unfallrisiko. Überbreite Fahrstreifen begünstigen insbesondere schwere Unfälle (hohe Unfallkostenrate). Fahrstreifenbreiten von  $B = 3,50$  m bzw. Fahrbahnbreiten zwischen  $7,00 \text{ m} \leq B \leq 8,50$  m haben sich als vorteilhaft für die Verkehrssicherheit herausgestellt. Dabei wird in der Literatur zum Teil unterstellt, dass Strecken mit breiteren Querschnitten auch eine großzügigere Linienführung haben, was zu einer höheren Sicherheit beiträgt. Aktuelle Unfallauswertungen getrennt nach den Unfalltypen 1 (Fahrunfall) und 6 (Unfall im Längsverkehr) bzw. unter Berücksichtigung der Aspekte der Linienführung sind nicht bekannt. Differenzierte Unfallanalysen können somit den Beitrag der Fahrbahnbreite zur Verkehrssicherheit verdeutlichen.

Kurvenradien von  $R < 100$  m sind als besonders kritisch einzustufen. Radien von  $R < 200$  m weisen ebenfalls noch erhöhte Unfallkenngrößen auf. Bei weiterführenden Analysen des Unfallgeschehens sollten Kurven Mindestlängen aufweisen, um den Einfluss des „Kurvenschneidens“ gering zu halten. In der Literatur werden dazu Öffnungswinkel der Radien von  $\alpha \geq 3,5$  gon (LIPPOLD 1997) bzw. Mindestlängen von  $L = 50$  m (EBERSBACH 2006) empfohlen.

Die Lageplanelemente sind in ihrer Größe und Folge aufeinander abzustimmen (Relationstrassierung). Nicht relationstrassierte Streckenabschnitte führen zu größeren Geschwindigkeitsdifferenzen in den Elementfolgen ( $\Delta V > 15$  km/h), die sich nachteilig auf die Verkehrssicherheit auswirken. Dabei hat sich das prozentuale Maß der Abweichung von den Forderungen der RAL (FGSV 2012a) in mehreren Modellen zur Bewertung der Verkehrssicherheit als signifikantes Merkmal herausgestellt (vgl. z. B. MAIER U. A. 2012, BARK U. A. 2015, BERGER 2016). Die Einstufungen in die Kategorien keine bis hohe Abweichungen wurden dort zunächst ingenieurtechnisch festgelegt. Dieses Maß ist daher hinsichtlich seiner Schwellenwerte genauer zu quantifizieren.

Die Kurvigkeit als Durchschnittswert eines Streckenabschnitts erlaubt keine Rückschlüsse auf die Verkehrssicherheit. Der „Kurvigkeit des Einzelbogens“ und der Kurvigkeitdifferenz nach STEYER (2004) werden Einflüsse auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit zugesprochen. Deren Eignung für netzweite sicherheitstechnische Untersuchungen ist genauer zu prüfen.

Geringe Längsneigungen ( $s \leq 4$  %) verbessern die Verkehrssicherheit und die Verkehrsqualität. Starke Gefällestrecken haben sich zum Teil als kritisch erwiesen. Einheitliche Grenzwerte konnten in den verschiedenen Untersuchungen allerdings nicht beobachtet werden. In Anbetracht der geringen Signifikanz der Ergebnisse und wirtschaftlicher Aspekte erscheinen systematische Umbauempfehlungen von Streckenabschnitten aufgrund hoher Längsneigungen als nicht gerechtfertigt. Die Längsneigung wird daher bei den weiteren Untersuchungen als einzelnes Merkmal nicht berücksichtigt.

Die Elemente des Höhenplans sollen mit den Elementen des Lageplans einen ausgewogenen und frühzeitig erkennbaren räumlichen Verlauf ergeben. Bei der Überlagerung kann es zu Defiziten der räumlichen Linienführung kommen. Kritische

Sichtschattenbereiche und verdeckte Kurvenbeginne sind als unsicher anzusehen. Größere Abbildungsverzerrungen haben ebenfalls einen Einfluss auf das Fahrverhalten. Ein allgemeiner Zusammenhang zum Unfallgeschehen konnte allerdings nicht nachgewiesen werden.

In der Literatur gibt es keine Auswertungen des Unfallgeschehens in Abhängigkeit von entwässerungsschwachen Zonen auf Landstraßen. Sie sind allerdings bisher nicht als allgemeines Problem bekannt.

Sichtweiten von  $SW > 200$  m ermöglichen dem Fahrer eine rechtzeitige Erfassung des Fahrraums ohne erhöhte Aufmerksamkeitsanforderungen. Geringere Sichtweiten führen zu höheren Beanspruchungen und abrupten Reaktionen der Fahrer und haben zunehmend Einfluss auf das Fahrverhalten. Sie sind insbesondere dann als sicherheitskritisch einzuschätzen ( $SW < 100$  m), wenn sie dem Eindruck der Linienführung widersprechen. Bei statistischen Analysen zum Einfluss der Sichtweite auf das Unfallgeschehen (insbesondere der Fahrunfälle) traten oft starke Korrelationen zur Kurvigkeit auf. Sichtweiten sind zudem nur sehr aufwendig zu erheben. Sie sind nicht Bestandteil weiterer sicherheitstechnischer Untersuchungen, da sie nicht in einem wirtschaftlich und zeitlich vertretbaren Rahmen für ganze Straßennetze erhoben werden können.

Verschiedene Untersuchungen berücksichtigen auch psychophysiologische Aspekte (Beanspruchung der Kraftfahrer) um die Qualität der Linienführung einer Straße zu beurteilen. Erhöhte Beanspruchungen resultierten zumeist aus (abrupten) Geschwindigkeitsanpassungen.

Die Gleichförmigkeit bzw. Ungleichförmigkeit des Geschwindigkeitsverhaltens der Kraftfahrer über den Streckenverlauf wurde ebenfalls als Maß für die Güte der Linienführung herangezogen. Das Geschwindigkeitsverhalten kann durch geometrische Parameter abgeschätzt werden. Dabei haben sich insbesondere die Kurvigkeit bzw. die Kurvigkeitsdifferenz (Differenz aus der mittleren gewichteten Kurvigkeit als streckencharakteristischer Parameter des Annäherungsbereichs und der Kurvigkeit des Einzelbogens) und die Fahrbahnbreite als maßgebende Einflussgrößen herausgestellt.

Anhand der aufgeführten Erkenntnisse werden folgende Parameter/Kenngrößen als maßgebend erachtet und deren Einfluss auf die Verkehrssicherheit bei weiteren sicherheitstechnischen Untersuchungen qualifiziert bzw. quantifiziert:

- die Fahrbahnbreite,
- der Kurvenradius,
- die Kurvigkeit des Einzelbogens,
- die Relationstrassierung,
- die Kurvigkeitsdifferenz,
- der verdeckte Kurvenbeginn und
- der Sichtschattenbereich.

Für entwurfstechnische Bewertungen sollten die gültigen Richtlinien als Maßstab herangezogen werden.

## 2.2 Stand der Regelwerke

### 2.2.1 Gestaltungsgrundsätze der Entwurfsrichtlinien

Bereits in früheren Richtliniengenerationen erfolgte die Trassierung von Straßen anhand von maßgebenden Geschwindigkeiten. Es wurde die Entwurfsgeschwindigkeit  $V_e$  als Leitgröße zur Gestaltung der Linienführung eingeführt. Diese hing zunächst von dem Schwierigkeitsgrad des Geländes und der Verkehrsbelastung ab (FGSV 1959) und stellte später eine wirtschaftlich, technisch begründete und der Netzfunktion der Straße angemessene Leitgröße dar (FGSV 1973, FGSV 1984, FGSV 1995). Der Entwurfsgeschwindigkeit waren Grenz- und Richtwerte bestimmter Trassierungselemente (Kurvenradien, Klothoidenparameter, Längsneigungen, Kuppen- und Wannenhalmesser) zugeordnet. So sollte die Stetigkeit und Wirtschaftlichkeit längerer Straßenabschnitte sichergestellt werden. Die Entwurfsgeschwindigkeit  $V_e$  wurde anhand der Verbindungsbedeutung der Straße (Straßenkategorie) gewählt. In Abwägung der Belange der Verkehrsqualität und der topographischen Zwänge konnte diese jedoch in definierten Bereichen schwanken.

Weiterhin wurde eine Art Projektierungsgeschwindigkeit (Geschwindigkeit  $V_{85}$ ) als Kontrollgröße herangezogen (FGSV 1973, FGSV 1984, FGSV 1995). Sie beschreibt das tatsächliche Fahrverhalten und orientiert sich an der Geschwindigkeit, die 85 % der unbehindert fahrenden Pkw auf nasser Fahrbahn nicht überschreiten. Sie kann entweder gemessen oder anhand der Streckengeometrie abgeschätzt werden. Die Entwurfsgeschwindigkeit  $V_e$  sollte in einem iterativen Prozess der zu erwartenden Geschwindigkeit  $V_{85}$  angenähert werden. Differenzen waren nur in einem gewissen Maße zulässig. Dies gilt auch für Geschwindigkeitsdifferenzen  $\Delta V_{85}$  benachbarter Abschnitte. Außerdem wurden weitere sicherheitsrelevante Entwurfs-elemente (Kurvenmindestradien bei negativer Querneigung, Elemente der Sicht) anhand der Geschwindigkeit  $V_{85}$  bemessen.

Die Gestaltung des Querschnitts erfolgte hingegen nach anderen Gesichtspunkten in separaten Richtlinienteilen (FGSV 1956, FGSV 1974, FGSV 1982, FGSV 1996). Der Querschnitt wurde anhand der Netzfunktion der Straße und der Leistungsfähigkeit/Verkehrsstärke gewählt. Dazu waren Nachweise der Verkehrsqualität, der Verkehrssicherheit und der Wirtschaftlichkeit (Mindestauslastungsgrad der Regelquerschnitte) zu führen (FGSV 1996).

Aufgrund unterschiedlicher Prioritäten in den Abwägungsbelangen bei der Wahl der Entwurfsgeschwindigkeit  $V_e$  und den verschiedenen Eingangsgrößen zur Festlegung der Anforderungen von Linienführung und Querschnitt können Straßen derselben Verbindungsbedeutung (Straßenkategorie) ein unterschiedliches Erscheinungsbild aufweisen. Die besondere Bedeutung der Abstimmung zwischen den Elementen der Linienführung und des Querschnitts wurde in den Richtlinien nicht hinreichend betont.

Die „Richtlinien für die Anlage von Landstraßen“ (RAL - FGSV 2012a) haben u. a. zum Ziel, der Gestaltungsvielfalt von Straßen entgegenzuwirken. Zu diesem Zweck wurden wenige, standardisierte Landstraßentypen konzipiert. Die Entwurfsklasse (EKL) bestimmt als neue Leitgröße alle maßgebenden Entwurfs- und Gestaltungsparameter. Sie fördert somit die Wiedererkennbarkeit von Straßen desselben Typs und grenzt Straßen unterschiedlicher Kategorien in ihrem Erscheinungsbild deutlicher voneinander ab. Dem Kraftfahrer soll damit ein Eindruck der Netzfunktion der Straße vermittelt werden, sodass er sein Fahrverhalten intuitiv darauf anpasst.

Die Entwurfsklasse wird anhand der Straßenkategorie gemäß den „Richtlinien für die integrierte Netzgestaltung“ (RIN - FGSV 2008b) abgeleitet. Die Zuordnung der Entwurfsklasse zur Straßenkategorie kann anhand der Verkehrsstärke geprüft werden. Höherrangige bzw. niederrangige Zuordnungen sind bei stärkerer bzw. schwächerer Verkehrsbelastung möglich. Allerdings sollte dies nur unter Berücksichtigung des gesamten Streckenzuges erfolgen. Der Wechsel der Entwurfsklasse auf kurzen Streckenabschnitten würde dem Ziel der RAL (FGSV 2012a) nach gleichartiger Gestaltung der Straße widersprechen und ist demnach zu vermeiden.

Andere europäische Länder entwickelten ähnliche Ansätze zum Entwurf ihrer Straßen (z. B. die Niederlande). Die Gestaltungs- und Betriebsparameter der RAL (FGSV 2012a) sind vorwiegend auf die Erkenntnisse entsprechender Sicherheitsuntersuchungen (vgl. Ziffer 2.1), fahrdynamischen Berechnungen und Erfahrungen zurückzuführen.

## **2.2.2 Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL)**

### **Querschnitt**

Der Gestaltung des Querschnitts liegen die maximal zulässigen Abmessungen von Fahrzeugen nach StVZO ( $B = 2,55 \text{ m}$  und  $H = 4,00 \text{ m}$ ) und deren Bewegungsspielräume (Verkehrsraum) sowie obere und seitliche Sicherheitsräume zu Grunde.

Die Querschnittsgestaltung ist nach den RAL (FGSV 2012a) ein prägendes Merkmal für das Prinzip der standardisierten und wiedererkennbaren Straßentypen. Es werden für jede Entwurfsklasse ein einbahniger Regelquerschnitt sowie eine spezielle Form der Markierung vorgesehen (vgl. Tab. 2-10). Die besondere Art der Markierungen, insbesondere der EKL 1 und EKL 4, ist auf Untersuchungen von LIPPOLD U. A. (2013) und SCHLAG U. A. (2013) zurückzuführen. Die Ziffer des Regelquerschnitts gibt die Kronenbreite der Straße an (Fahrbahnbreite + Breite der seitlichen Bankette). Die Fahrbahn besteht aus den Fahrstreifen, den Randstreifen und ggf. dem verkehrstechnischen Mittelstreifen.

Mit den Regelquerschnitten der RAL (FGSV 2012a) wird das Überholprinzip bestimmt. Straßen der EKL 1 werden durchgängig dreistreifig ausgebildet. Der alternierende Überholfahrstreifen gewährleistet auf ca. 40 % der Strecke (für jede Richtung) sichere Überholmöglichkeiten. Die Fahrrichtungen werden durch einen 1,00 m breiten verkehrstechnischen Mittelstreifen getrennt. Auch bei Straßen der EKL 2 soll der Überholvorgang - verkehrstechnisch gesichert - auf Überholfahrstreifen erfolgen. Der zusätzliche Überholfahrstreifen wird hier allerdings nicht durchgängig sondern abschnittsweise angeordnet, sodass dieser auf ca. 20 % der Strecke (je Richtung) vorhanden ist. Die Fahrrichtungen werden in dreistreifigen Bereichen durch eine durchgezogene Doppellinie voneinander abgegrenzt. Dies gilt auch für zweistreifige Abschnitte, wo das Überholen aufgrund besonderer Risiken (z. B. unzureichende Sichtweiten) unterbunden werden soll. Ist die Anlage von Überholfahrstreifen in hinreichender Anzahl nicht zu verwirklichen, soll geprüft werden, ob in den zweistreifigen Bereichen mit ausreichenden Sichtweiten das Überholen unter Nutzung des Fahrstreifens für den Gegenverkehr erlaubt wird. Die Mitteltrennung erfolgt dann durch eine doppelte Leitlinie (vgl. Tab. 2-10 – EKL 2 – rechte Grafik). Der zweistreifige Querschnitt RQ 11 ist für Straßen der EKL 3 vorgesehen. Überholvorgänge sollen hier i. A. unter Nutzung des Fahrstreifens für den Gegenverkehr stattfinden (Fahrrichtungstrennung durch eine

einfache Leitlinie). Ist das Überholen aus Sicherheitsgründen zu untersagen, werden die Fahrrichtungen durch einfache Fahrstreifenbegrenzungslinien getrennt. Auf Straßen der EKL 4 wird der RQ 9 angewandt (vgl. Tab. 2-10 – EKL 4). Der Querschnitt besitzt keine Fahrrichtungstrennung und Fahrstreifenbegrenzungen. Es werden lediglich seitlich eingerückte Leitlinien markiert. Die optische Einengung der Fahrbahn soll zu einer angepassten Fahrweise der Kraftfahrer führen. Zudem sollen durch die Verschiebung des Verkehrs auf die Kernfahrbahn die Bankette geschont werden. Diese Effekte würden sich nach SCHLAG U. A. (2013) bei größerem Randabstand der seitlichen Markierungen ( $d = 1,00\text{ m}$ ) verstärken. Der Querschnitt kommt nur für geringe Verkehrsstärken ( $DTV \leq 3.000\text{ Kfz/24h}$  und  $DTV_{SV} \leq 150\text{ Kfz/24h}$ ) in Betracht. Das Überholen ist hier nicht erwünscht.

Tab. 2-10: Einbahnige Regelquerschnitte nach den RAL (FGSV 2012a)

Entwurfsklasse	Regelquerschnitt Abmessungen in [m]
<b>EKL 1</b> RQ 15,5	
<b>EKL 2</b> RQ 11,5+	
<b>EKL 3</b> RQ 11	
<b>EKL 4</b> RQ 9	

Straßen der EKL 1 bis EKL 3 werden i. A. mit Fahrstreifenbreiten von  $B = 3,50$  m ausgebildet. Dieser Wert hatte sich bei BRANNOLTE U. A. (1993), PALM/SCHMIDT (1999) und ZIMMERMANN/RIFFEL (2013) als vorteilhaft herausgestellt. Bei niedrigen Verkehrsbelastungen besteht für Straßen der EKL 3 die Möglichkeit, geringere Fahrstreifenbreiten zu prüfen. Hinweise dazu sind in den Allgemeinen Rundschreiben des Bundes und der Länder zur Einführung der RAL (FGSV 2012a) enthalten. Allerdings wird stets auf mögliche Sicherheitsnachteile bei Reduzierung der Fahrstreifenbreite hingewiesen.

Straßen der EKL 4 haben eine Fahrbahnbreite von  $B = 6,00$  m (RQ 9). HEGEWALD/WEBER (2008) erwarten aufgrund der Verbreiterung der befestigten Fläche des schmalsten Querschnitts der RAL (FGSV 2012a) von  $B = 5,50$  m auf  $B = 6,00$  m und der neuen Form der Markierung (seitlich eingerückte Fahrbahnbegrenzungslinien) positive Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit.

### Lageplan

Die Größe und Abfolge von Kreisbogenradien haben einen deutlichen Einfluss auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit (vgl. Ziffer 2.1.2 und Ziffer 2.1.6). Die RAL (FGSV 2012a) definieren dazu drei Anforderungen:

- Radienbereiche in Abhängigkeit von der Entwurfsklasse,
- Abstimmung aufeinanderfolgender Kurvenradien und
- Mindestradien im Anschluss an Geraden.

Die Mindestwerte der Radien (vgl. Tab. 2-11) sichern ein gleichmäßiges Fahren mit der der Entwurfsklasse zugrundeliegenden Planungsgeschwindigkeit. Die von vielen Autoren als kritisch erachteten Kurvenradien von  $R < 200$  m (vgl. Kapitel 2.1.2) sollten demnach auch bei der niedrigsten Entwurfsklasse (EKL 4) nicht angewandt werden.

Die obere Bereichsgrenze soll zur Gesamtwirkung des Straßentyps beitragen (vgl. auch Empfehlungen von DURTH U. A. 1983). Größere Radien können dann gewählt werden, wenn sich die Straße dadurch besser ins Landschaftsbild einpasst. Allerdings ist dabei zu beachten, dass eine gestreckte Linienführung ggf. Überholmöglichkeiten in Abschnitten suggeriert, die kein sicheres Überholen zulassen (insbesondere bei den Entwurfsklassen EKL 3 und EKL 4).

Tab. 2-11: Empfohlene Radien und Mindestlängen von Kreisbögen (FGSV 2012a)

Entwurfs- klasse	Radienbereiche R [m]	Mindestlängen von Kreisbögen min L [m]
EKL 1	$\geq 500$	70
EKL 2	400 - 900	60
EKL 3	300 - 600	50
EKL 4	200 - 400	40

Die Bedeutung der Relationstrassierung wurde in mehreren Untersuchungen hervorgehoben (vgl. Kapitel 2.1.2). Die von LIPPOLD (1997) weiterentwickelte Radientulpe wurde inhaltlich in die RAS-L (FGSV 1995) und die RAL (FGSV 2012a) übernommen. Demzufolge sind nur bestimmte Verhältnisse aufeinanderfolgender Kurvenradien



zulässig (vgl. Abb. 2-9). Dabei ist generell der gute Bereich anzustreben. Dies gilt auch für Kurvenfolgen mit Zwischengeraden von  $L_G < 300$  m.

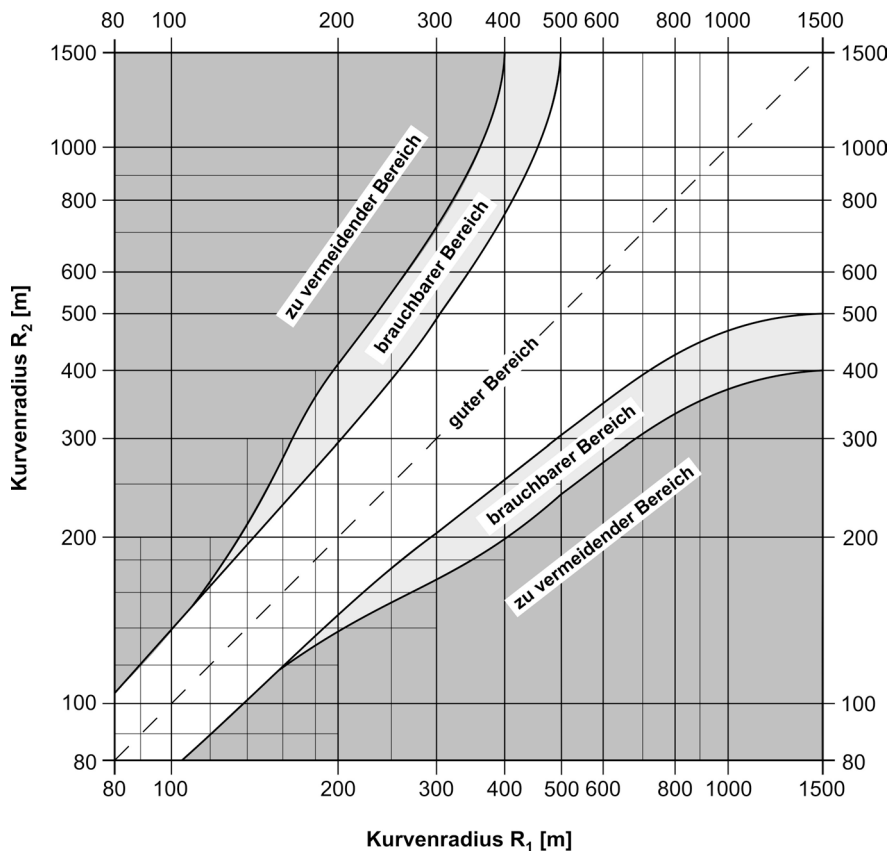


Abb. 2-9: Verhältnis aufeinanderfolgender Radien (FGSV 2012a)

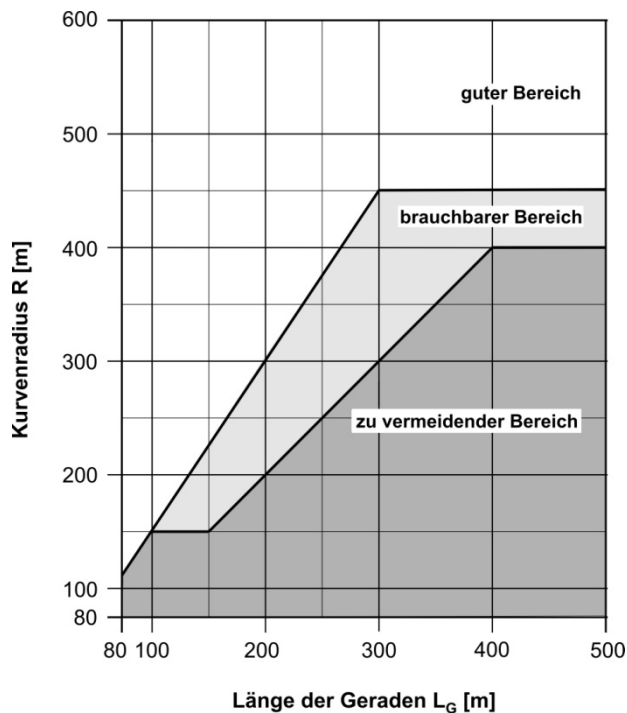


Abb. 2-10: Radien im Anschluss an Geraden (FGSV 2012a)

Weiterhin sind Mindestradien im Anschluss an Geraden zu gewährleisten (vgl. Abb. 2-10). Die Richtwerte von LIPPOLD (1997) sind hier als Grenze zwischen dem brauchbaren und zu vermeidenden Bereich wiederzufinden. Der Übergang zum guten Bereich liegt 50 % oberhalb des brauchbaren Bereichs ( $150 \text{ m} \leq L_G \leq 300 \text{ m}$ ). Ab Geradenlängen von  $L_G = 300 \text{ m}$  sind Radien von  $R \geq 450 \text{ m}$  vorzusehen.

Müssen Elementrelationen außerhalb des guten Bereichs gewählt werden (in zu begründeten Ausnahmefällen), sollen flankierende verkehrstechnische Maßnahmen (Richtungstafeln in Kurven ggf. kombiniert mit dem Gefahrenzeichen Kurve) auf diese besondere Situation hinweisen (vgl. Empfehlungen von KREBS/DAMIANOFF 1983 und WEISE/STEYER 1999).

### Räumliche Linienführung

Der räumliche Eindruck/Verlauf einer Straße ergibt sich aus der Überlagerung der Entwurfsebenen Querschnitt, Lageplan und Höhenplan. Dieser Verlauf kann durch besondere Gestaltung des Umfeldes (z. B. Bepflanzungen) verdeutlicht werden. Der dadurch entstehende Fahrraum muss für den Kraftfahrer rechtzeitig erkennbar, begreifbar, übersichtlich und eindeutig sein (FGSV 2012a).

Werden die Entwurfsebenen (Lageplan und Höhenplan) nicht ausreichend aufeinander abgestimmt, kann es zu Defiziten der räumlichen Linienführung kommen. Diese können hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit differenziert werden (vgl. Tab. 2-12). Kritische Sichtschattenbereiche und verdeckte Kurvenbeginne sind generell (Neubau sowie Um- und Ausbau) zu vermeiden.

Tab. 2-12: Auswirkungen von Defiziten der räumlichen Linienführung (FGSV 2012a)

Defizit	Einfluss auf Fahrverhalten und Verkehrssicherheit
Sichtschatten	hoch
Verdeckter Kurvenbeginn	hoch
Dehnungen	mittel
Stauchungen	gering
Gestalterische Defizite (Knicke, Abplattung, Aufwölbung)	gering

Sichtschattenbereiche entstehen für den Kraftfahrer (Augpunkthöhe  $h_A = 1,00 \text{ m}$ ), wenn nähere Bereiche des Fahrbahnbandes nicht einsehbar sind, der spätere Verlauf (Entfernung  $\leq 600 \text{ m}$ ) allerdings erkennbar ist. Besteht eine Sichtschattentiefe  $\geq 0,75 \text{ m}$  über mehrere Stationsbereiche des Kraftfahrers (mind.  $75 \text{ m}$ ), ist der Sichtschatten als kritisch einzuschätzen (vgl. Abb. 2-11). Dies gilt insbesondere dort, wo Überholvorgänge unter Nutzung des Fahrstreifens für den Gegenverkehr erlaubt sind.

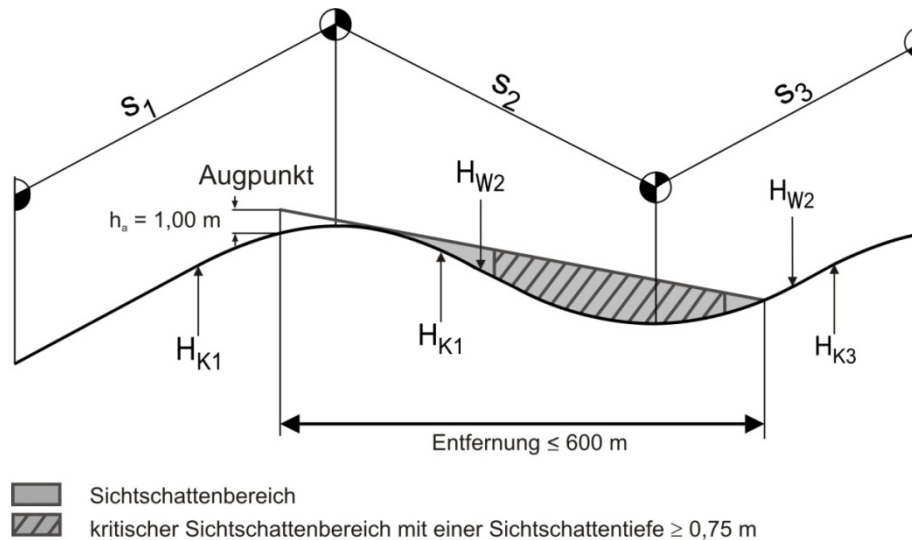


Abb. 2-11: Kritischer Sichtschattenbereich (FGSV 2012a)

Der Beginn von Kurven sollte für den Kraftfahrer frühzeitig zu erfassen sein. Ist aus einer Entfernung von 75 m vor Kurvenbeginn eine Richtungsänderung von  $3,5\text{ gon}$  nicht zu erkennen, liegt ein verdeckter Kurvenbeginn vor. Werden Kurven mit großen Klothoidenparametern ( $A \geq 300\text{ m}$ ) ausgebildet, ist eine einsehbare Länge von 100 m ausreichend (vgl. ZIMMERMANN U. A. 2007).

Bei der Überlagerung von Lageplankurven mit Höhenplanausrundungen erscheinen die Radien bei Wannen gestreckter und bei Kuppen gestauchter. Dehnungen sind dabei kritischer einzuschätzen als Stauchungen (FGSV 2012a - vgl. auch STEYER 2004). Es wird bei wannenüberlagerten Kurven daher empfohlen, ein Verhältnis von Radius zu Halbmesser  $R : H \leq 1 : 10$  zu wählen (vgl. ZIMMERMANN U. A. 2007).

### 2.2.3 Merkblatt zur Übertragung des Prinzips der Entwurfsklassen auf bestehende Straßen (M EKLBest)

Damit sich die Verkehrssicherheit auf Landstraßen nachhaltig verbessert, ist auch das bestehende Straßennetz an das Prinzip der RAL nach Standardisierung und Wiedererkennbarkeit sukzessive anzupassen. Das zumeist an historische Strukturen angepasste Bestandsnetz genügt häufig nicht den Ansprüchen einer sicher und komfortabel zu befahrenden Straße. Es ist also festzulegen, welche grundsätzlichen Gestaltungs- und Wiedererkennungsmerkmale zur Kennzeichnung einer Straße mit der entsprechenden Entwurfsklasse zwingend erforderlich sind. Dazu wird das „Merkblatt zur Übertragung des Prinzips der Entwurfsklassen auf bestehende Straßen“ (M EKLBest - FGSV 2018) erarbeitet. Das Merkblatt zeigt Strategien, wie das Prinzip der Entwurfsklassen (z. B. im Zuge von Umbau- und Erhaltungsmaßnahmen) auf bestehende Straßen übertragen werden kann. Dabei werden Mindestanforderungen in Abhängigkeit von der angestrebten Entwurfsklasse hinsichtlich

- des Querschnitts,
- der Linienführung,
- der Führung im Knotenpunkt und
- der Betriebsform

definiert (vgl. Tab. 2-13).

Können die wesentlichen Anforderungen der aufgeführten Merkmale nicht erfüllt werden, ist von einer Kennzeichnung als Straße einer bestimmten Entwurfsklasse abzusehen.

Die aufgeführten Entwurfs- und Betriebsmerkmale sind vor allem für Straßen der EKL 1 und der EKL 2 maßgebend. Bei Straßen der EKL 3 und der EKL 4 werden lediglich Mindestbreiten vorausgesetzt. Weitere sicherheitsrelevante Merkmale (insbesondere die Aspekte der Linienführung) sind in dem bereits verfestigten Arbeitsstand des M EKLBest (FGSV 2018) bei der Kennzeichnung als Straße der EKL 3 bzw. EKL 4 nicht zu beachten.

Die Fahrbahnbreite ist nach dem M EKLBest (FGSV 2018) somit das wichtigste voraussetzende Merkmal zur Kennzeichnung eines bestehenden Streckenabschnitts als Straße der entsprechenden Entwurfsklasse. Bei Straßen im Bestand entsprechen die Fahrbahnbreiten oft nicht den Festlegungen der RAL (FGSV 2012a). Im M EKLBest (FGSV 2018) werden daher Empfehlungen - differenziert nach den vier Entwurfsklassen - formuliert, wie Mehr- oder Minderbreiten auf den Fahrstreifen, den Randstreifen und ggf. den verkehrstechnischen Mittelstreifen aufgeteilt werden sollen.

Tab. 2-13: Mindestvoraussetzungen für die Kennzeichnung von Abschnitten innerhalb von Streckenzügen nach dem M EKLBest (FGSV 2018)

<b>Streckenzug</b>	<b>EKL 1</b>	<b>EKL 2</b>	<b>EKL 3</b>	<b>EKL 4</b>
<b>Betriebsform</b>	Kraftfahrstraße	kein Radverkehr auf der Fahrbahn	-	-
<b>Fahrbahnbreite [m]</b>	$B \geq 8,75^*$ , $B \geq 11,50^{**}$	$B \geq 7,50^*$ , $B \geq 11,00^{**}$	$B \geq 6,00$	$4,00 \leq B < 6,50$
<b>Überholfahrstreifen***</b>	Anteil $\geq 30\%$ und 3 Überholfahrstreifen	Anteil $\geq 15\%$ und 2 Überholfahrstreifen	-	-
<b>Linienführung</b>	min R = 350 m und Radianrelationen im guten Bereich	min R = 350 m und Radianrelationen im brauchbaren Bereich**	-	-
<b>Wege und Zufahrten</b>	keine Anbindungen	nur rechts abbiegen und rechts einbiegen**	-	-
<b>Knotenpunkte</b>	teilplanfrei	Kreuzungen signalgeregelt****	-	-

\* in zweistreifigen Abschnitten

\*\* in dreistreifigen Abschnitten

\*\*\* Diese Mindestvoraussetzung gilt nicht für einen einzelnen Abschnitt, wenn sie in absehbarer Zeit in mehreren aufeinanderfolgenden Abschnitten erfüllt wird. Forderungen gelten für jede Fahrtrichtung.

\*\*\*\* Ausnahmen sind Kreuzungen mit sehr schwachen Verkehrsstärken in den untergeordneten Knotenpunktzufahrten.

Wird ein Streckenzug schrittweise zu einer bestimmten Entwurfsklasse entwickelt, entstehen i. A. Übergänge zu Streckenabschnitten im Bestand. Diese sind sorgfältig zu planen. Die Übergänge sind vorzugsweise im Bereich von Knotenpunkten vorzusehen. Nicht vermeidbare Übergänge auf der freien Strecke sollten in „übersichtlichen Streckenteilen mit gestreckter Linienführung“ erfolgen (FGSV 2018). Das MEKLBEST (FGSV 2018) behandelt die Übergänge von höherrangigen zu niederrangigen Entwurfsklassen bzw. zu Strecken im Bestand und stellt entsprechende Systemlösungen grafisch dar.

Die in den Tabellen des MEKLBEST (FGSV 2018) angegebenen Fahrbahnbreiten (Abweichungen von den hervorgehobenen Regemaßen) sind nicht als Empfehlungen für den Um- und Ausbau mit derartigen Abmessungen zu verstehen. Im Zuge von Um- und Ausbaumaßnahmen sind vorrangig die Anforderungen der RAL (FGSV 2012a) zu beachten.

#### **2.2.4 Erhaltungsplanung**

Die „Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen“ (RPE-Stra 01 - FGSV 2001a) regeln die systematische Erhaltungsplanung. Auf Grundlage der Bewertungen von der Netzqualität und der Zustandsentwicklung können Erhaltungsstrategien und –programme entwickelt werden.

Die Bewertung der Netzqualität umfasst die Analyse von

- dem Oberflächenzustand,
- dem Befestigungszustand und
- der Qualität sonstiger Netz- und Anlagenelemente.

Die Bewertung des Oberflächenzustandes erfolgt nach den ZTV ZEB-StB (FGSV 2006).

Die Bewertung des Befestigungszustandes ist nach den „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen“ (RStO - FGSV 2012b) durchzuführen. Die Ergebnisse der Bewertung des Befestigungszustandes lassen sich in vier Qualitätsstufen darstellen.

Weiterhin ist die Qualität sonstiger Netz- und Anlageelemente zu bewerten. Dazu sind

- Streckencharakteristik,
- Querschnittselemente,
- Knotenpunkte und
- Entwässerungseinrichtungen

zu überprüfen. Die Überprüfung beruht auf einem Ist/Soll-Vergleich der vorhandenen Straßen mit den Anforderungen der entsprechenden Richtlinien. Die einzelnen zu bewertenden Kriterien sind in einer Checkliste zusammengestellt (vgl. Anhang A). Die Bewertung soll in vier Qualitätsstufen vorgenommen werden. Allerdings ist zur Bewertung der einzelnen Kriterien kein Schema vorgegeben. Die Einschätzung der einzelnen Kriterien bleibt dem Anwender vorbehalten.

Die Ergebnisse der jeweiligen Bewertungen sollten im Anschluss u. a. in Form von Streckenbändern und Netzkarten visualisiert werden. Weiterhin sind in einem mehrstufigen Verfahren homogene Abschnitte<sup>5</sup> zu bilden (FGSV 2001a).

Die Zustandsentwicklung dieser Abschnitte kann über Verhaltensfunktionen prognostiziert werden. Dadurch ist es möglich, den Bedarf und den Eingreifzeitpunkt von Erhaltungsmaßnahmen abzuschätzen. Die Planung der Maßnahmen ist an definierten Zielen auszurichten (Erhaltungsstrategie).

Erhaltungsstrategien beschreiben eine Folge von Erhaltungsmaßnahmen in einem definierten Zeitraum. Dabei sind der Eingreifzeitpunkt und die Art der Maßnahme von besonderer Bedeutung (vgl. SCHMUCK U. A. 1986, SCHMUCK/MAERSCHALK 1987, HINSCH U. A. 1990, SCHMUCK 1993, HELLER U. A. 1997, MAERSCHALK 1997, KRAUSE 2000).

Netzweite Strategieszenarien können rechnergestützt mittels Pavement-Management-Systemen (PMS) dargestellt werden. Das PMS ordnet Schäden an der Straßenbefestigung (näherungsweise ermittelt über Verhaltensfunktionen) Mängelklassen zu. Anhand der Mängelklassen können mögliche Schadensursachen und die betroffenen Befestigungsschichten abgeschätzt werden. Eine Erhaltungsmaßnahme beeinflusst den Zustandswert und die Verhaltenskurve eines Merkmals (abhängig von der Art der Maßnahme, der Mängelklasse und der Verhaltensklasse). Die Fläche zwischen der Verhaltenskurve ohne und mit Maßnahme kann als qualitatives Kriterium für den Nutzen angesehen werden (vgl. Abb. 2-12).

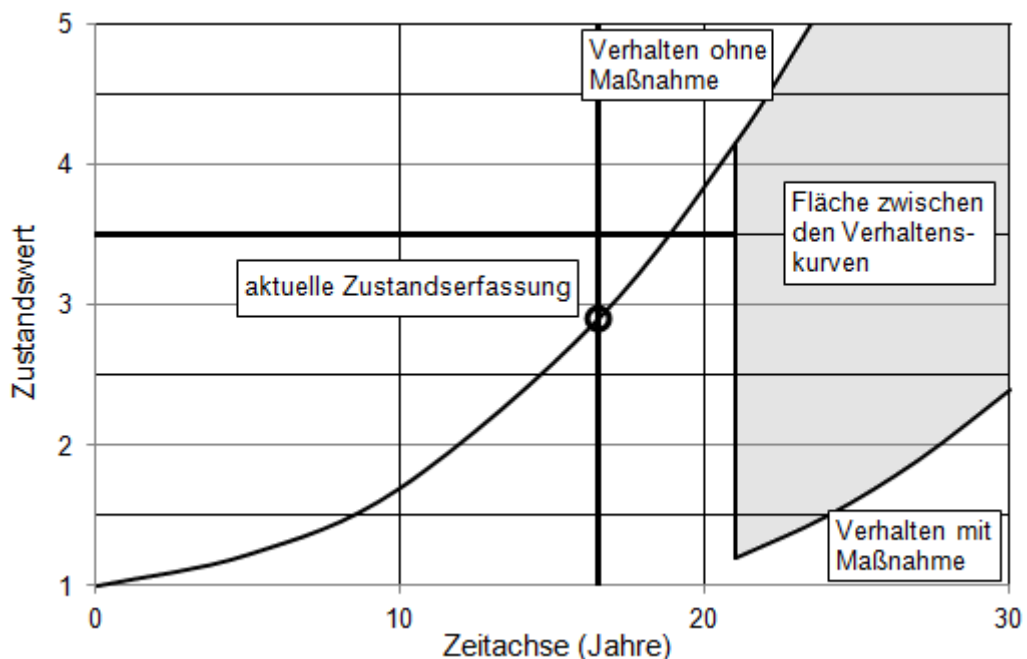


Abb. 2-12: Ermittlung des Nutzens einer Maßnahme nach KRAUSE (2001)

<sup>5</sup> Homogene Abschnitte sind Abschnitte von Straßen mit gleichen oder vergleichbaren Eigenschaften hinsichtlich definierter Kriterien (z. B. Deckenbauweise, Verkehrsbelastung, Zustandswerte getrennt nach den Merkmalen).

Zur netzweiten Optimierung der Maßnahmen wird der Nutzen des einzelnen Abschnitts mit der Länge und dem Verkehrsaufkommen gewichtet. Die "optimalen" Erhaltungsmaßnahmen werden letztlich anhand des Nutzen/Kosten-Profiles der Maßnahme, des vorliegenden Straßennetzes und des Betrachtungszeitraums, der Budgetvorgaben sowie sonstiger Randbedingungen ermittelt (KRAUSE 2001). Zudem hat die Festlegung der Steuerungsparameter (Verhaltensfunktionen, Eingreifbereiche, Rücksetzwerte und Maßnahmewirkungen) einen großen Einfluss auf die Ergebnisse der Pavement-Management-Systeme (MAERSCHALK/KRAUSE 2004, KRAUSE/MAERSCHALK 2010).

Mittels solcher Systeme können Finanzvorgaben in Erhaltungsprogramme („Finanzszenario“) umgesetzt oder Zielvorstellungen bezüglich der künftigen Netzqualität und Zustandsentwicklungen („Qualitätsszenario“) analysiert werden (MAERSCHALK/SOCINA 2008).

Als Ergebnis der Pavement-Management-Systeme liegt eine sogenannte Projektreihe der Maßnahmen vor (maximaler Nutzen bei verfügbarem Budget). Der Nutzen beschränkt sich hier hauptsächlich auf die Belange des Straßenbaus (Verbesserung des Straßenzustands). Weitere volkswirtschaftliche Aspekte zur Bewertung der Maßnahmen werden (derzeit) in Pavement-Management-Systemen nicht berücksichtigt. SOCINA/KOMMA (2015) empfehlen daher, Nutzerkosten zu bestimmen und sie in die gesamtwirtschaftliche Bewertung von Erhaltungsstrategien einzubeziehen. Die Nutzerkosten setzen sich in ihren Untersuchungen aus den Kosten durch Zeitverluste, den Kraftstoffmehrkosten und den Unfallmehrkosten zusammen. Die Unfall(mehr)-kosten hängen vom Straßentyp (pauschaler Wert nach den EWS - FGSV 1997), vom Stauaufkommen und von der Fahrstreifenanzahl in der Arbeitsstelle ab. Das tatsächlich vorhandene Unfallgeschehen eines Streckenabschnitts und die damit verbundenen volkswirtschaftlichen Kosten sind nicht Bestandteil bestehender Verfahren/Empfehlungen für die Erhaltungsplanung.

### **2.2.5 Schlussfolgerungen für die Untersuchung**

Die RAL (FGSV 2012a) sollen zur Verbesserung der Verkehrssicherheit auf Landstraßen beitragen. Dazu werden (wenige) standardisierte Straßentypen definiert. Die Entwurfsklasse als Leitgröße bestimmt alle für den Entwurf und Betrieb erforderlichen Parameter (Einheit von Bau und Betrieb). Die Parameter der einzelnen Entwurfs-ebenen (Querschnitt - Lageplan - Höhenplan) sind aufeinander abgestimmt und wurden vorwiegend anhand der Erkenntnisse von Forschungsarbeiten festgelegt. Sie gewährleisten die Wiedererkennbarkeit/Abgrenzung von Straßen desselben/unterschiedlichen Typs.

Damit sich die Verkehrssicherheit auf Landstraßen nachhaltig verbessert, muss dieses Prinzip auch auf das bestehende Straßennetz übertragen werden. Im Zuge von Erhaltungs- bzw. Um-/Ausbaumaßnahmen sind somit die Straßen sukzessive an das Erscheinungsbild der RAL (FGSV 2012a) anzupassen. Das M EKLBest (FGSV 2018) gibt zudem Hinweise, wie das „Gesicht“ der RAL (FGSV 2012a) auf bestehende Straßen übertragen werden kann. Dabei ist die Fahrbahnbreite das maßgebende Kriterium. Anforderungen an die Linienführung werden nur bei Straßen der EKL 1 und EKL 2, also Straßen mit Überholfahrstreifen, formuliert.

Die systematische Erhaltungsplanung wird in den RPE-Stra 01 (FGSV 2001a) geregelt. Anhand dieser Rahmenrichtlinien wurden gemeinsam von Bund und Ländern die Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) und das rechnergestützte Pavement-Management-System (PMS) entwickelt. „Mit dem PMS können die Wirkungen gewählter Erhaltungsmaßnahmen abgeschätzt, die mittelfristigen Erhaltungsplanungen besser bewertet und die Erhaltungsprogramme netzweit optimiert werden“ (BMVBW 2001). Sie helfen, Art und Zeitpunkt von Erhaltungsmaßnahmen sinnvoll (größter Nutzen bei verfügbarem Budget) und objektiv auszuwählen. Der Nutzen wird dabei vorrangig über die Verbesserung des Straßenzustands definiert. Es werden bereits Ansätze diskutiert, Nutzerkosten in die gesamtwirtschaftliche Bewertung einzubeziehen (vgl. SOCINA/KOMMA 2015). Kosten infolge des tatsächlichen Unfallgeschehens werden derzeit nicht berücksichtigt. Eine Erweiterung der Nutzendefinition um diesen Aspekt ist aus volkswirtschaftlicher Sicht sinnvoll.

Entwurfstechnische Belange sind derzeit ebenfalls nicht Bestandteil bestehender Verfahren für die Erhaltungsplanung. Sie sollten allerdings insbesondere bei den Empfehlungen für Erhaltungsmaßnahmen beachtet werden. Dazu ist zu prüfen, welche Abweichungen von den Anforderungen der Entwurfsrichtlinien zu deutlichen Einschränkungen in der Verkehrssicherheit führen.



## **3 Ziel der Arbeit und Vorgehensweise**

### **3.1 Ziel und Abgrenzung der Arbeit**

Die eingangs dargestellte Situation verdeutlicht, dass entwurfs- und sicherheitstechnische Belange auch beim Erhaltungsmanagement von Landstraßen berücksichtigt werden sollten. Die Sicherheit von Landstraßen wird maßgeblich durch die Entwurfs- und Betriebsmerkmale der freien Strecke und der Knotenpunkte beeinflusst. Knotenpunkte sollen grundsätzlich den Anforderungen hinsichtlich Erkennbarkeit, Übersichtlichkeit, Begreifbarkeit und Befahrbarkeit genügen. Die bauliche Grundform ist dazu im Verlauf einer Straße in Abhängigkeit von der Verbindungsbedeutung (Straßenkategorie) einheitlich auszubilden (FGSV 2012a). Die Gestaltung von Knotenpunkten ist in den Entwurfsrichtlinien verbindlich geregelt. Sicherheitsrelevante Defizite sind leichter fassbar. Es bestehen bereits Instrumentarien, um die Sicherheit an Knotenpunkten zu bewerten und Umgestaltungsempfehlungen abzuleiten (vgl. GDV 2002, WOLF U. A. 2018). Sie sind deshalb nicht Bestandteil der folgenden Untersuchungen. Die Standards von Knotenpunkten sollten aber grundsätzlich berücksichtigt werden.

Die (aktive) Sicherheit von Abschnitten der freien Strecke hängt vorwiegend von der geometrischen Gestaltung der Straße ab. In der Literatur werden verschiedene Ansätze beschrieben, um die Linienführung von Straßen zu beurteilen (vgl. Ziffer 2.1.6, z. B. SCHNEIDER 1986, LAMM U. A. 1992, BÖHM 1997, SOSSOUMIHEN 2001 UND STEYER 2004). Diese Verfahren wurden entwickelt, um ausgewählte Streckenabschnitte auf deren Sicherheit und Ausbaubedarf zu prüfen. Dazu wurden neben entwurfstechnischen Merkmalen u. a. auch Aspekte des Fahrverhaltens und der Fahrdynamik zur Bewertung herangezogen. Diese Kenngrößen/Parameter sind zum Teil nur sehr aufwändig zu erheben. Deshalb muss eine Übertragung dieser Methoden auf Netzebene aus zeitlichen und wirtschaftlichen Gründen ausgeschlossen werden. Es ist daher ein Verfahren zur entwurfstechnischen Bewertung von Straßen zu entwickeln, das die maßgebenden Gestaltungsmerkmale berücksichtigt und dessen Datengrundlage zur flächendeckenden Anwendung auf Netzebene mit vertretbarem Aufwand zu erstellen ist.

Die Ergebnisse der entwurfstechnischen Analyse sind beim Erhaltungsmanagement von Straßen zu beachten. In Abhängigkeit von den vorhandenen Defiziten sind aus sicherheitstechnischer und volkswirtschaftlicher Sicht nur bestimmte Erhaltungsmaßnahmen sinnvoll bzw. ergänzende Maßnahmen nötig. Geeignete bzw. zulässige Maßnahmen werden differenziert dargestellt. Pavement-Management-Systeme haben sich als Werkzeuge für die Erhaltungsplanung etabliert. Diese Empfehlungen sind daher in das PMS zu integrieren.

Begrenzte finanzielle Mittel der Straßenbaulastträger erfordern eine Priorisierung der Streckenabschnitte. Zur Bildung von Rang- und Reihenfolgen berechnen Pavement-Management-Systeme den Nutzen von Erhaltungsmaßnahmen (nichtmonetärer Wert, vorrangig abgeleitet aus der Verbesserung des Straßenzustands) und stellen dies den Kosten gegenüber (Nutzwertanalyse). Diese Form der Priorisierung soll letztlich um sicherheitstechnische Überlegungen erweitert werden.

Die Untersuchungen beschränken sich entsprechend der eingangs dargestellten Situation auf Außerortsstraßen ohne Autobahnen (Landstraßen gemäß der Definition in Kapitel 1).

Damit ergeben sich für die vorliegende Arbeit folgende fünf konkrete Zielstellungen:

- 1) Die in der Literatur beschriebenen Zusammenhänge entwurfstechnischer Parameter zum Unfallgeschehen sind auf Aktualität zu prüfen. Der Einfluss einzelner Entwurfparameter auf die Verkehrssicherheit ist zum Teil differenzierter auszuwerten.
- 2) Den entwurfstechnischen Berechnungen und Festlegungen der RAL (FGSV 2012a) liegen „Sicherheitspuffer“ zu Grunde. Dieser Sicherheitszuschlag ist anhand der zuvor durchgeführten Sicherheitsanalysen genauer zu quantifizieren und ein Maß zulässiger Abweichungen von den Entwurfsvorgaben abzuschätzen bzw. abzugrenzen.
- 3) Darauf aufbauend ist ein Verfahren zur netzweiten entwurfstechnischen Bewertung von Landstraßen zu entwickeln und Umbau- bzw. Umgestaltungsmaßnahmen abzuleiten.
- 4) Zulässige Erhaltungsmaßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen sind in Abhängigkeit von den bestehenden entwurfstechnischen Defiziten festzulegen.
- 5) Die bisherigen Methoden zur Bildung von Rang- und Reihenfolgen im Erhaltungsmanagement sind um sicherheitstechnische Aspekte zu erweitern.

### **3.2 Allgemeine Vorgehensweise**

Die sicherheitstechnischen Untersuchungen erfordern eine netzweite und qualitativ hochwertige Datengrundlage. Dazu werden zunächst Möglichkeiten und Verfahren beschrieben, Straßendaten flächendeckend zu ermitteln bzw. mit vertretbarem Aufwand zu erheben und zu berechnen. Die Erhebungsmethoden (Ziffer 3.3) und Berechnungsverfahren (Ziffer 3.4) basieren auf Daten der Straßendatenbanken und Fahrtrajektorien speziell ausgestatteter Messfahrzeuge. Diese können auch auf andere Straßennetze übertragen werden.

Den Vorgaben in den Richtlinien liegen Sicherheitsreserven zu Grunde. Bei Straßen im Bestand führen geringfügige Abweichungen von den jeweiligen Anforderungen nicht zwangsläufig zu Einschränkungen der Verkehrssicherheit. Zulässige Abweichungen sind somit anhand sicherheitstechnischer Untersuchungen genauer abzugrenzen. Der Einfluss der Ausprägung der jeweiligen Parameter auf die Verkehrssicherheit wird mittels relativer Unfallkenngrößen bestimmt (Ziffer 3.5). Die Ergebnisse sind in Kapitel 4 dargestellt. Die maßgebenden Entwurfparameter werden für verschiedene Streckenkollektive berechnet, die sich zum Teil hinsichtlich ihrer Charakteristika unterscheiden. Die sicherheitstechnischen Analysen werden daher sowohl für das gesamte Streckenkollektiv als auch für verschiedene Untersuchungskollektive durchgeführt (Ziffer 4.1).

Aus den Ergebnissen der sicherheitstechnischen Untersuchungen wird das Verfahren zur entwurfstechnischen Bewertung von Landstraßen abgeleitet (Ziffer 5.1). Das Verfahren beruht auf einem dreistufigen Bewertungssystem. Es ist so aufgebaut, dass einzelne Bausteine an dem Ziel der Bewertung ausgerichtet werden können. Damit sind je nach Ausrichtung unterschiedliche Anforderungen/Kriterien denkbar. In Abhängigkeit von den bestehenden Defiziten der Streckengeometrie werden zulässige Erhaltungsmaßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen festgelegt, die in Pavement-Management-Systemen berücksichtigt werden können (Ziffer 5.2.4).

Die in Pavement-Management-Systemen ausgegebenen Rang- und Reihenfolgen beruhen auf Nutzwertanalysen. Der Nutzen wird dabei aus der Fläche zwischen den Zustandsverhaltenskurven mit und ohne Erhaltungsmaßnahme abgeschätzt und mit dem Verkehrsaufkommen gewichtet. Diese Definition des Nutzens wird um sicherheitstechnische Überlegungen ergänzt (Ziffer 5.2.6).

Letztlich wird anhand der in Ziffer 5.1 und Ziffer 5.2 aufgeführten Erkenntnisse und Empfehlungen das Verfahren zur Berücksichtigung von entwurfs- und sicherheitstechnischen Aspekten bei Pavement-Management-Systemen abgeleitet und der Verfahrensablauf übersichtlich zusammengefasst (Ziffer 5.3). Die Ergebnisse aus Kapitel 4 und die Empfehlungen aus Ziffer 5.1 erlauben es zudem, obwohl nicht Bestandteil der eigentlichen Zielstellung der Arbeit, ein Verfahren zur Abschätzung des Ausbaubedarfs von Straßennetzen zu beschreiben (Ziffer 5.4).

Das allgemeine Vorgehen der Arbeit ist in Abb. 3-1 veranschaulicht. Die in Ziffer 3.1 formulierten Ziele sind in den einzelnen Arbeitsschritten und in der darauf aufbauenden Gliederung der Arbeit wiederzufinden. Grundlage für die jeweiligen Arbeitsschritte sind Daten, die im Rahmen von den in Kapitel 1 aufgelisteten Forschungsvorhaben erhoben wurden.

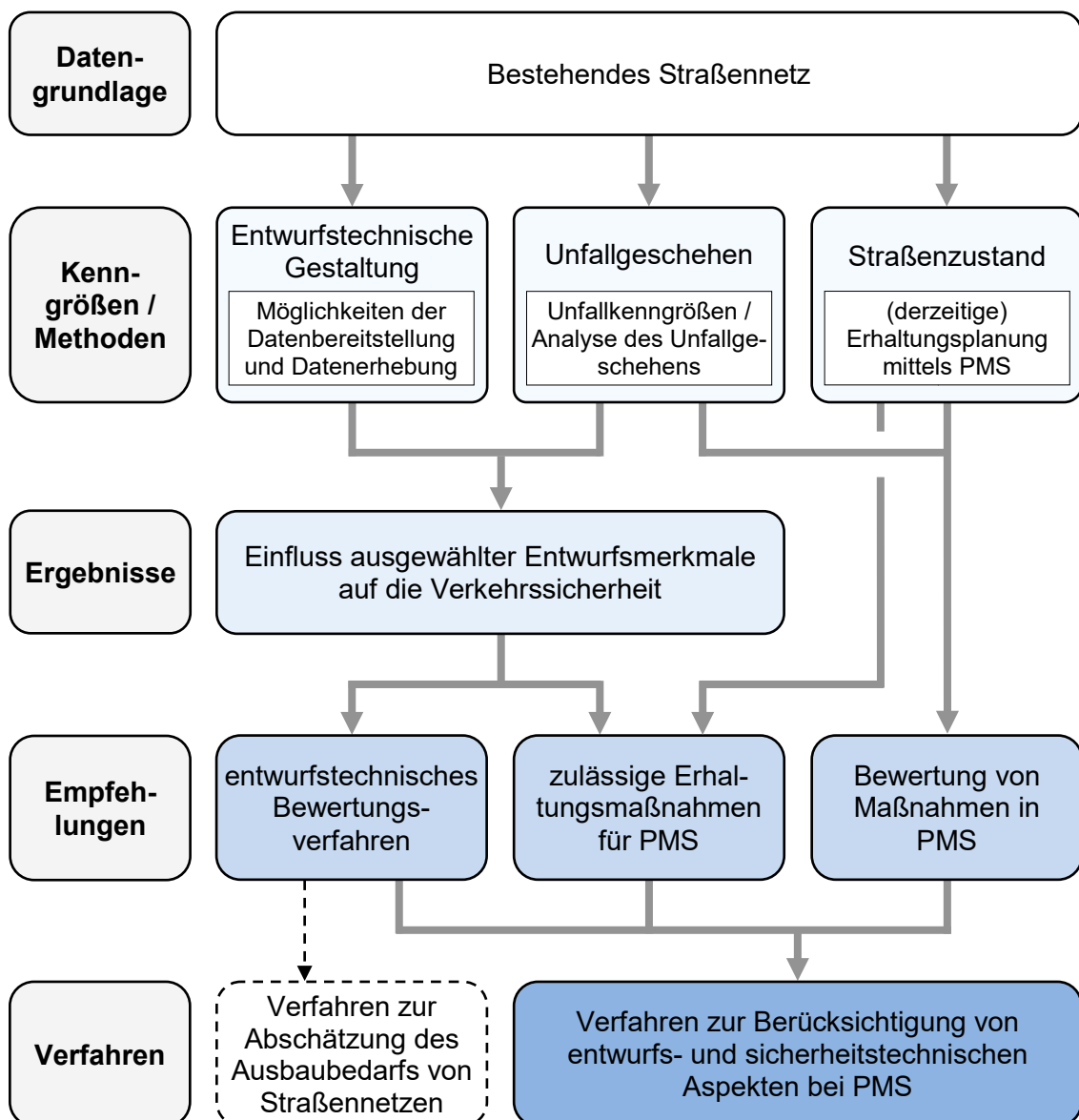


Abb. 3-1: Methodisches Vorgehen

### 3.3 Möglichkeiten der Datenbereitstellung und Datenerhebung

Zur Ermittlung und Berechnung der in Ziffer 2.1.7 aufgeführten Parameter/Kenngrößen sind folgende Daten erforderlich:

- Angaben zu den Querschnittselementen und -breiten (Fahrstreifenbreite und Randstreifenbreite),
- Elemente des Lageplans (Art und Größe der Achselemente) und
- Höhenangaben (Höhenpunkte der Gradiente).

Diese Daten sind in den Straßendatenbanken enthalten.

#### 3.3.1 Straßendatenbanken

Mit dem Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau Nr. 24/2010 gab das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS - jetzt BMVI) die „Anweisung Straßeninformationsbank (ASB)“ in der Version 2.01 bekannt. Die ASB beschreiben standardisierte Objekte und Strukturen zur digitalen Aufnahme, Bearbeitung und Vorhaltung von Merkmalen des Straßen- und Verkehrswesens. Die Objektdaten bzw. Objektinformationen werden in definierten Tabellen (im dBASE-Format) angegeben.

Die Datenbanktabellen werden über ein Netzknotten-Kanten-Modell referenziert. Verschiedene Merkmale können somit über „Anfangsnetzknotten“, „Endnetzknotten“ und „Stationsbereich“ miteinander verknüpft werden (BMVBS 2009). Die Vollständigkeit/Qualität der Datensätze ist insgesamt sehr heterogen (vgl. Tab. 3-1).

Tab. 3-1: Vollständigkeit und Qualität ausgewählter SIB-Daten<sup>6</sup>

Datenart	Vollständigkeit	Qualität
Querschnittsdaten (DA 104)	gut	gut
Daten des Lageplans (DA 106)	mittel	mittel
Daten des Höhenplans (DA 107)	mittel	gering

Angaben zu den Querschnitten sind i. A. flächendeckend vorhanden. Die Qualität dieser Daten wurde an ausgewählten Streckenabschnitten geprüft und erscheint für entwurfstechnische Untersuchungen geeignet (vgl. Anhang B). Hingegen sind die Daten zur Linienführung nicht in der gewünschten Qualität verfügbar (vgl. LERCH U. A. 2014).

Die Achselemente der Straßendatenbanken wurden zum Teil durch Programme automatisch ermittelt. Der „Trass-O-Mat“ (vgl. auch Ziffer 3.3.2) berechnet beispielsweise die Elemente des Lageplans anhand der Krümmungsänderung (SCHULZ 2002). Unter bestimmten Randbedingungen kann der Algorithmus allerdings keine richtigen Achselemente einrechnen. Die Folge sind „unbekannte“ Elemente (Art = U). Weiterhin werden größere und längere Kurvenradien häufig falsch abgebildet (vgl. Abb. 3-2). Hier kann es dazu kommen, dass der Algorithmus fälschlicherweise Zwischengeraden berechnet (grüne Linie). Aufgrund der gleichen Richtungsänderung der Kurve weisen

<sup>6</sup> Die Einschätzung der Vollständigkeit und der Qualität von Datensätzen der Straßendatenbanken beruhen auf Erfahrungen aus den Projekten zur „Erhaltungsstrategie für Staatsstraßen im Freistaat Sachsen“ (LERCH U. A. 2014) und zur „Entwurfstechnischen Bewertung des Grundnetzes im Land Brandenburg“ (LIPPOLD U. A. 2011b).

die angrenzenden Radien dadurch wesentlich kleinere Werte auf. Diese Achselemente sind damit für entwurfstechnische Bewertungen ungeeignet. LIPPOLD U. A. (2011b) kamen zu den gleichen Schlussfolgerungen.



Abb. 3-2: Achse der SIB (links) und nachtrassierte Achse aus Befahrungsdaten (rechts) eines Abschnitts der Staatsstraße S 25 (Luftbild: <https://geodienste.sachsen.de>)

Höhenpunkte werden in den Straßendatenbanken in nicht definierten und meist größeren Stationsabständen angegeben (häufig nur im Abstand von 50 m). Weiterhin treten größere absolute und relative Ungenauigkeiten auf (vgl. Abb. 3-3). Der Höhenverlauf oder gar Höhenplanelemente können damit nicht ausreichend genau abgeschätzt werden.

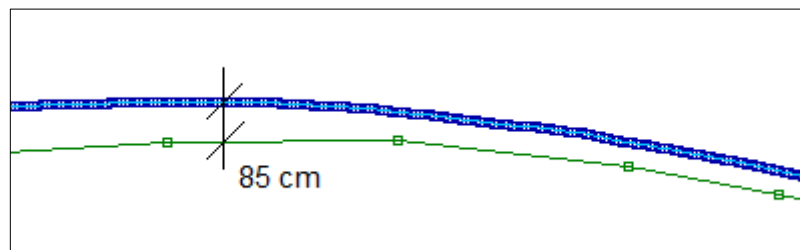


Abb. 3-3: Höhenpunkte eines Abschnitts der Staatsstraße S 24 aus Befahrungsdaten (blau) und SIB-Daten (grün)

### 3.3.2 Kinematische Datenerfassung und Datenaufbereitung

Befahrungsdaten können über speziell ausgerüstete Forschungs- und Messfahrzeuge erhoben werden. Die TU Dresden hat ein solches Forschungsfahrzeug mit hochgenauem, satellitengestütztem Positionierungssystem aufgebaut (vgl. Abb. 3-4). Die Position des Fahrzeugs wird durch zwei GPS-Antennen, ein Inertialsystem und Wegstreckensensoren genau ermittelt. Die Genauigkeit der darüber aufgezeichneten GPS-Punkte wird im „Postprocessing“ durch die Nutzung von Korrekturdaten (z. B. von SAPOS) nochmals verbessert. Im Ergebnis der Datenprozessierung stehen Fahrbahnrandpunkte (Applanix-Trajektorien mit absoluten Koordinatenangaben - Rechtswert, Hochwert, Höhe) in einem Abstand von 1,00 m zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung.

Das Forschungsfahrzeug ist weiterhin mit einem Stereo-Frontkamarasystem ausgestattet. Die Bildauslösung erfolgt wegabhängig in einem definierten Intervall (5,00 m). Die Kameras sind photogrammetrisch kalibriert und eignen sich somit zur relativen Objektvermessung mit absolutem Koordinatenbezug. Die aufgenommenen Bilder können mit einer speziellen Software („RoadView“) visualisiert werden. Die strukturierte „Bilderdokumentation“ erlaubt das virtuelle Befahren der Straße und das nachträgliche Erheben von Ausstattungsmerkmalen (wie z.B. Verkehrszeichen, Baumreihen usw.).



Abb. 3-4: Forschungsfahrzeug "UNO" der TU Dresden

Vergleichbare Fahrzeuge werden heutzutage zur messtechnischen Erfassung des Straßenzustandes eingesetzt. Die Zustandserfassung und -bewertung von Straßen (ZEB) wird für das klassifizierte Straßennetz (Autobahnen, Bundesstraßen und Landes-/Staatsstraßen) turnusmäßig im Vier-Jahres-Rhythmus durchgeführt. Demnach verfügen die Straßenbaulastträger flächendeckend über aktuelle Befahrungsdaten.

Auf Grundlage der Applanix-Trajektorien und der daraus abgeleiteten Mittellinien (als Kleinpunktfolgen) können Achselemente berechnet werden. Dazu entwickelte SCHULZ (2002) das Programm „Trass-O-Mat“. Es ermöglicht die teilautomatisierte Berechnung der Elemente des Lageplans anhand von Kleinpunktfolgen und stellt die Achsdaten im Austauschformat DA<sup>7</sup> 40 bereit. Bei hoher Lagegenauigkeit und Dichte der Punktfolge

---

<sup>7</sup> Die Datenart (DA) - auch Objektklasse - regelt Struktur und Typ der zu verwaltenden Datenbankinhalte.

sind sehr hohe Genauigkeiten erreichbar (SCHULZ 2002). Eine Überprüfung der automatisch berechneten Achselemente ist allerdings aus den in Ziffer 3.3.1 genannten Gründen zwingend erforderlich.

Das Straßenentwurfsprogramm CARD/1 bietet mit dem Modul „Automatische Achse“ ebenfalls die Möglichkeit, Achselemente mittels zugeordneten und sortierten Punktmengen zu berechnen. Die notwendigen Grundeinstellungen sind für jede Achse einzeln vorzunehmen, da es derzeit noch nicht möglich ist, diese Funktionen über CardSkript anzusteuern. Programme wie „Autolt“<sup>8</sup> ermöglichen es, diese Abläufe noch weiter zu automatisieren, indem sie vorgefertigte Windowsbefehle/-eingaben (Tastatureingaben und Mausklicks) simulieren.

Die Güte der Achsen ist auch hier zu prüfen. Dazu können u. a. hochauflösende Orthofotos (z. B. über WMS<sup>9</sup>) in das CARD/1-Projekt eingebunden und Fahrungsauflösungen (z. B. Umfahren von Hindernissen) dadurch erkannt und angepasst werden (vgl. Abb. 3-5). Weiterhin kann im CARD/1 auch die Gradienten der Straße teilautomatisiert berechnet werden.



Abb. 3-5: Achstrassierung im Straßenentwurfsprogramm CARD/1

<sup>8</sup> Autolt, Entwickler: Looneytune & Team, Lizenz: Freeware, <https://www.autoitscript.com/>

<sup>9</sup> Ein Web Map Service (WMS) ist eine Schnittstelle zur Bereitstellung digitaler Karten über das World Wide Web. Dieser Service wird von vielen Bundesländern (zum Teil kostenpflichtig) angeboten.

CARD/1 wie auch andere Straßenentwurfsprogramme sehen als Schnittstelle zum Austausch von Achsdaten i. A. nur die DA 40 (Achselemente mit absolutem Koordinatenbezug) vor. Die in den Straßendatenbanken angegebenen Achsen werden hingegen über die DA 106 (Achselemente mit Bezug zum Straßennetz: Netzknoten-Kanten-Modell - vgl. Ziffer 3.3.1) verwaltet. Zur Bereitstellung der DA 106 ist somit ein weiterer Arbeitsschritt nötig. Die in CARD/1 berechneten Achsen können über die Funktion „erweiterte Kleinpunkte“ mit den maßgebenden Eigenschaften (inkl. Höheninformation) als Achskleinpunktlisten (Stationsabstand: 1,00 m) ausgegeben und in eine separate Datenbank (z. B. PostgreSQL<sup>10</sup>) importiert werden. Die Netzzuordnung der bis dato nicht referenzierten Kleinpunkte erfolgt mit dem Programm Marmeda<sup>11</sup>. Mit einer räumlichen Datenbankabfrage (PostgreSQL) kann letztlich anhand der Kleinpunktfolge die DA 106 SIB-konform erstellt werden.

### 3.4 Netzweite Berechnung entwurfstechnischer Parameter

Die im Folgenden vorgestellten Berechnungsverfahren wurden programmtechnisch umgesetzt (Shell-Skripte). Sie basieren auf PostgreSQL.

#### 3.4.1 Abgrenzung der Straßenabschnitte

Es werden nur Abschnitte der freien Strecke untersucht (keine Ortsdurchfahrten). Diese können sich folgendermaßen ergeben (vgl. Abb. 3-6):

- Abschnitt zwischen zwei Netzknoten,
- Abschnitt zwischen Netzknoten und Ortsdurchfahrt und
- Abschnitt zwischen zwei Ortsdurchfahrten.

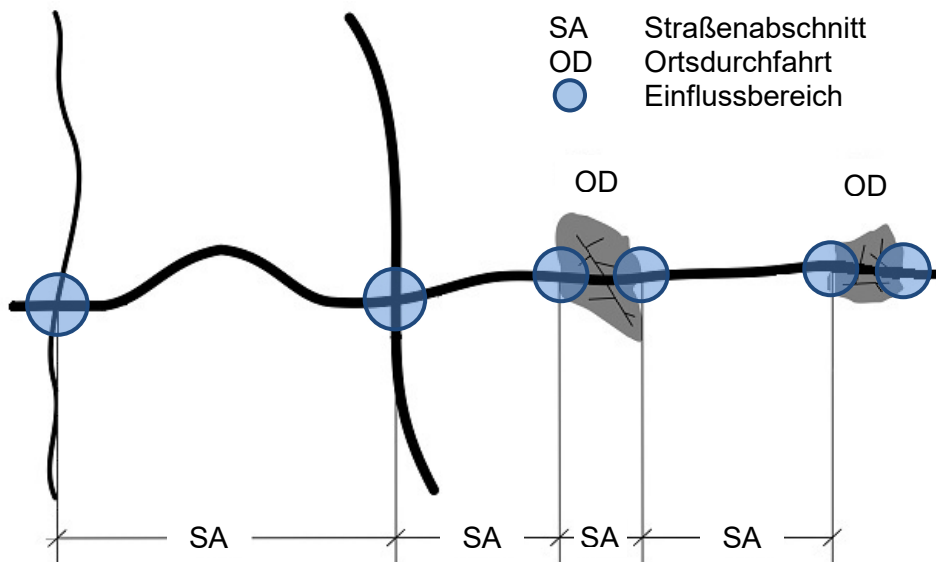


Abb. 3-6: Abgrenzung der Straßenabschnitte, Abbildung in Anlehnung an die RAL (FGSV 2012a)

<sup>10</sup> PostgreSQL ist ein frei zugängliches relationales Datenbankmanagementsystem, welches auch die Verwaltung geometrischer Informationen ermöglicht.

<sup>11</sup> Marmeda ist ein eigens am Lehrstuhl Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen (TU Dresden) entwickeltes Programm zur Verwaltung und Berechnung von Straßendaten.



Knotenpunkte werden besonders gestaltet und ausgestattet (z. B. Abkröpfungen der Zufahrten in der untergeordneten Straße und Fahrstreifenaufweitungen für Linksabbiegestreifen in der übergeordneten Straße). Sie haben einen Einfluss auf die Verkehrssicherheit der unmittelbar angrenzenden Bereiche. STEINAUER/SCHUCKLIEß (2008) ermittelten dazu Standardeinflussbereiche in Abhängigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 300 m ( $V_{zul} = 70$  km/h) und 400 m ( $V_{zul} = 100$  km/h). BERGER (2016) untersuchte für sein Streckenkollektiv (3.215 km) ebenfalls die Länge des Einflussbereiches der Knotenpunkte. Dazu verglich er schrittweise die Unfalltypenstruktur von knotenpunktnahen (zentraler Knotenbereich: 25 m + Ringpuffer:  $n * 25$  m) und vom Knotenpunkt unbeeinflussten (Abstand  $\geq 600$  m) Abschnitten. Dabei stellte sich unabhängig von der Ausstattung (ohne/mit LSA) und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit eine Länge des Einflussbereiches von  $L_{EB} = 300$  m heraus (plangleiche Knotenpunkte außer Kreisverkehre).

Ortsdurchfahrten werden durch das Verkehrszeichen Z 310 bzw. Z 311 StVO abgegrenzt. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit innerhalb von Ortschaften beträgt i. A.  $V_{zul} = 50$  km/h. Die Bereiche vor/nach Ortsdurchfahrten sind demnach durch Geschwindigkeitsanpassungen zur freien Strecke gekennzeichnet. BERGER (2016) ermittelte hierfür eine Länge des Einflussbereiches von  $L_{EB} = 200$  m. BUCK (1992) stellte in seinen Untersuchungen zum Geschwindigkeitsverhalten auf Außerortsstraßen fest, dass Verkehrsteilnehmer bereits 300 m vor der Ortstafel beginnen, ihre Geschwindigkeit zu reduzieren.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wird für die Analyse des Unfallgeschehens ein einheitlicher Einflussbereich der Knotenpunkte und Ortsdurchfahrten von  $L_{EB} = 300$  m angenommen. Dieser Bereich wird bei den folgenden sicherheitstechnischen Untersuchungen nicht ausgewertet. Um in den (unbeeinflussten) Bereichen der freien Strecke eine gewisse Anzahl an auswertbaren Elementen zu gewährleisten, werden nur Straßenabschnitte mit einer Länge von  $L \geq 1.000$  m herangezogen.

### 3.4.2 Berechnung der Fahrbahnbreite

Die Fahrbreite eines Straßenabschnitts kann aus den Daten der SIB berechnet werden (vgl. Ziffer 3.3.1). Die Breite eines Teilbereichs wird über die Querschnittsstreifenarten 100 („Fahrbahn“) und 410 („Randstreifen“) berechnet (vgl. BMVBS 2009). Erfahrungen im Umgang mit dieser Datenart zeigen, dass die Datenbanken vereinzelt kurze „Füll-elemente“ mit einer Breite von 5 cm enthalten (vgl. LERCH U. A. 2014). Daher werden nur Elemente der Querschnittsstreifenart 100 berücksichtigt, die einen Mindestwert von  $B \geq 1,00$  m aufweisen.

Die Fahrstreifenbreite wird als gewichtetes Mittel nach Gl. 3-1 berechnet.

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n B_i * L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad \text{Gl. 3-1}$$

B	[m]	Fahrbahnbreite des Straßenabschnitts (als gewichtetes Mittel)
$B_i$	[m]	Fahrbahnbreite des Teilbereichs
$L_i$	[m]	Länge des Teilbereichs

Fehlerhafte Breitenangaben der freien Strecke aufgrund von Knotenpunktaufweitungen sind bei klassifizierten Netzknoten durch die Abgrenzung der Einflussbereiche nicht zu erwarten. Auf den klassifizierten Netzknotenabschnitten können allerdings weitere

nichtklassifizierte Straßen (z. B. Gemeindestraßen) angebunden sein. Diese (in den Straßendatenbanken nicht erfassten) Knotenpunkte sind zum Teil ebenfalls mit Linksabbiegestreifen ausgestattet (vgl. auch VIETEN U. A. 2010). Erfahrungen aus dem Projekt zur entwurfstechnischen Bewertung des Grundnetzes im Land Brandenburg zeigen, dass das Erscheinungsbild dieser Anschlüsse vorwiegend dem Linksabbiegetyp LA4 der RAL (FGSV 2012a) ähnelt. Die Länge des Aufweitungsbereichs ist hier i. A. begrenzt (ca. 50 m). Bei Nichtberücksichtigung der Mehrbreite dieser Bereiche würde ein Fehler von etwa 10 cm pro Anschluss und Kilometer entstehen (Mindestlänge der Straßenabschnitte  $L_{\min} = 1.000$  m). Dieser Fehler erscheint aufgrund der Einteilung der Fahrbahnbreiten in Klassen (vgl. Ziffer 3.5.6) vertretbar und bleibt daher bei der Berechnung/Auswertung unberücksichtigt.

### 3.4.3 Berechnung der Elementrelationen

In den RAL (FGSV 2012a) werden für die Folge zweier Kreisbogenradien und für den Übergang von einer Gerade zum Kreisbogen zulässige Verhältnisse/Bereiche definiert.

Die dargestellten Bereiche können für EDV-technische Berechnungen über mathematische Funktionen angenähert werden. Als Maßstab wird die Grenze zwischen dem guten und brauchbaren Bereich herangezogen.

#### Verhältnis aufeinanderfolgender Radien (Relation R-R)

Der Kurvenverlauf (vgl. Abb. 2-9) wird über lineare Funktionen und Kreisgleichungen beschrieben. Die Kurve wird dazu in fünf Bereiche unterteilt (vgl. Tab. 3-2).

Tab. 3-2: Bereiche der „Radientulpe“ und deren mathematische Beschreibung

Radienbereich $R_1$ [m]	Formel zur Berechnung von $R_2$
$R_1 \leq 200$	$R_2 = 0,75 * R_1$
$200 < R_1 < 270$	$R_2 = \sqrt{(936m)^2 - (R_1 - 699m)^2} - 642m$
$270 \leq R_1 \leq 620$	$R_2 = 0,5 * R_1 + 55m$
$620 < R_1 < 1500$	$R_2 = \sqrt{(2402,5m)^2 - (R_1 - 1417m)^2} - 1901m$
$R_1 \geq 1500$	$R_2 = 500m$

Anhand der dargestellten Gleichungen kann in Abhängigkeit vom Radius der zuvor liegenden Kurve ( $R_1$ ) der nach den Richtlinien erforderliche Kurvenradius ( $R_2$ ) ermittelt werden. Dies gilt auch für Kurvenfolgen, die eine Zwischengerade mit einer Länge von  $L_G < 300$  m besitzen.

### Radien im Anschluss an Geraden (Relation G-R)

Der lineare Zusammenhang zwischen der Länge einer Geraden und der Größe des anschließenden Kurvenradius (vgl. Abb. 2-10) kann mittels zweier Geradengleichungen abgebildet werden (vgl. Tab. 3-3). Der erforderliche Kurvenradius (R) ergibt sich damit aus der Länge der zuvor liegenden Geraden.

Tab. 3-3: Radien im Anschluss an Geraden - mathematische Beschreibung

Länge der Geraden $L_G$ [m]	Formel zur Berechnung von R
$L_G < 300$	$R = 1,5 * L_G$
$L_G \geq 300$	$R = 450m$

### Bewertung der Relationen

Der tatsächlich vorhandene Radius wird mit den erforderlichen Radien aus den Relationen R-R und G-R ins Verhältnis gesetzt.

$$V = \frac{R_{vorh}}{R_{erf}} \quad \text{Gl. 3-2}$$

V	[-]	Verhältnis aus vorhandenem und erforderlichem Radius
$R_{vorh}$	[m]	vorhandener Radius
$R_{erf}$	[m]	erforderliche Radien aus den Relationen R-R und G-R

Bei einem Verhältniswert von  $V \geq 1$  liegen die Kurvenradien im guten Bereich.

#### 3.4.4 Berechnung der Kurvigkeitsdifferenzen

STEYER (2004) empfiehlt, die Stetigkeit von Kurven über Kurvigkeitsdifferenzen einzuschätzen. Diese beschreibt er als Differenz zwischen der Kurvigkeit des Einzelbogens und der mittleren gewichteten Kurvigkeit des Annäherungsbereiches.

Eine Kurve kann sich aus Kreisbögen und Klothoiden zusammensetzen. Deren Richtungsänderungen  $\alpha_i$  ergeben sich aus den folgenden Gleichungen.

$$\alpha_R = \frac{200 * L_R}{\pi * R} \quad \text{Gl. 3-3}$$

$\alpha_R$	[gon]	Richtungsänderung des Kreisbogens
$L_R$	[m]	Länge des Kreisbogens
R	[m]	Radius des Kreisbogens

$$\alpha_A = \frac{100 * A^2}{\pi * R^2} \quad \text{Gl. 3-4}$$

$\alpha_A$	[gon]	Richtungsänderung der Klothoide
A	[m]	Parameter der Klothoide
R	[m]	Stoßradius der Klothoide

Die Kurvigkeit des Einzelbogens berechnet sich folglich aus der Richtungsänderung der Kurve ( $\alpha = \alpha_R + \alpha_{A1} + \alpha_{A2}$ ) und der Kurvenlänge ( $L = L_R + L_{A1} + L_{A2}$ ).

$$KU_E = \frac{\alpha}{L} \quad \text{Gl. 3-5}$$

$KU_E$	[gon/km]	Kurvigkeit des Einzelbogens
$\alpha$	[gon]	Richtungsänderungswinkel der Kurve
$L$	[km]	Länge der Kurve

Die mittlere gewichtete Kurvigkeit charakterisiert die Stetigkeit des Annäherungsbereiches einer Kurve. Dazu sind die Lageplanelemente auf einer zurückliegenden Strecke von 400 m zu berücksichtigen. Es ist dabei davon auszugehen, dass der Einfluss des jeweiligen Trassierungselementes auf das Fahrverhalten in Abhängigkeit von der Länge und Entfernung zum Kurvenbeginn variiert. Daher werden die Kurvigkeiten der zurückliegenden Einzelelemente über deren Längen und einem Rangfaktor gewichtet (STEYER 2004).

$$KU_A = \frac{\sum_{i=1}^n f_i * KU_{Ei} * L_i}{\sum_{i=1}^n f_i * L_i} \quad \text{Gl. 3-6}$$

$KU_A$	[gon/km]	mittlere gewichtete Kurvigkeit des Annäherungsbereiches
$f_i$	[-]	Rangfaktor
$KU_{Ei}$	[gon/km]	Kurvigkeit des i-ten Einzelbogens
$L_i$	[km]	Länge des i-ten Einzelbogens

Klothoiden werden als Bestandteil der Kurve angesehen und erhalten keinen separaten Rang.

Die Kurvigkeitsdifferenz ergibt sich letztlich aus der Differenz von der Kurvigkeit des Einzelbogens zur mittleren gewichteten Kurvigkeit des Annäherungsbereiches.

$$\Delta KU = KU_E - KU_A \quad \text{Gl. 3-7}$$

$\Delta KU$	[gon/km]	Kurvigkeitsdifferenz
$KU_E$	[gon/km]	Kurvigkeit des Einzelbogens
$KU_A$	[gon/km]	mittlere gewichtete Kurvigkeit des Annäherungsbereiches

### 3.4.5 Detektierung von kritischen Sichtschattenbereichen

Sichtschattenbereiche entstehen, wenn der Nahbereich durch Sichthindernisse (z. B. aufgrund von Kuppen oder Böschungen) verdeckt ist und der weitere Verlauf einer Straße innerhalb einer Entfernung von 600 m wieder sichtbar wird. Diese Bereiche gelten als kritisch, wenn eine Sichtschattentiefe von 0,75 m über einem Stationsbereich von 75 m vorliegt (vgl. Ziffer 2.2.2). Das Auftreten von Sichtschattenbereichen hängt demnach vorwiegend vom höhenmäßigen Verlauf der Trasse ab und kann anhand der Höheninformationen der Achskleinpunkte geprüft werden. Die Ermittlung von kritischen Sichtschattenbereichen gliedert sich dazu in zwei Arbeitsschritte (vgl. auch WEISE U. A. 2002):

1. Berechnung der Sichtschattentiefen für jede Augstation und
2. Detektierung kritischer Sichtschattenbereiche.

### Berechnung der Sichtschattentiefen für jede Augstation

In Anlehnung an die Modellvorstellungen der RAL (FGSV 2012a) werden für die Augstation (Aughöhe  $h_A = 1,00$  m) die Anstiege  $m_i$  zu den nachfolgenden Stationen berechnet.

$$m_i = \frac{H_i - (H_A + \text{Aughöhe})}{S_i - S_A} \quad \text{Gl. 3-8}$$

$m_i$	[-]	Anstieg des Sichtstrahls zur Station i
$H_i$	[m]	Höhe der Straße an der Station $S_i$
$H_A$	[m]	Höhe der Straße an der Augstation $S_A$
$S_i$	[m]	Station i
$S_A$	[m]	Augstation
Aughöhe	[m]	gemäß Modell RAL (FGSV 2012a): $H = 1,00$ m

Liegt ein Sichtschattenbereich vor, ergibt sich für  $m_i$  an der Station  $S_{\max}$  ein lokales Maximum ( $m_{\max}$ ). Ist das Fahrbahnband innerhalb einer Entfernung von 600 m wieder einzusehen, so trifft der Sichtstrahl (rote Linie) durch den Punkt  $P_{\max}$  ( $S_{\max}; H_{\max}$ ) an dem Punkt  $P_2$  ( $S_2; H_2$ ) wieder auf die Straße (vgl. Abb. 3-7).

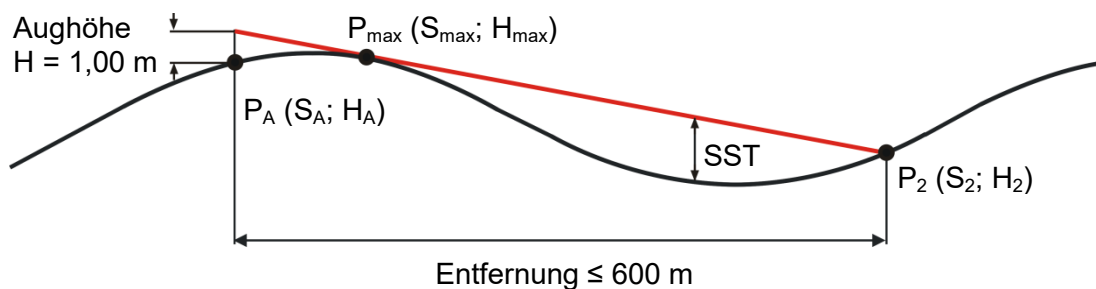


Abb. 3-7: Prinzipskizze zur Ermittlung von kritischen Sichtschattentiefen

Mittels der Geradengleichung des Sichtstrahls können die Sichtschattentiefen zwischen  $P_{\max}$  und  $P_2$  ( $S_{\max} < S_i < S_2$ ) berechnet werden.

$$SST_i = H_{\max} + m_{\max} * (S_i - S_{\max}) - H_i \quad \text{Gl. 3-9}$$

$SST_i$	[m]	Sichtschattentiefe an der Station i
$H_{\max}$	[m]	Höhe der Straße an der Station $S_{\max}$
$m_{\max}$	[-]	Anstieg des Sichtstrahls durch den Punkt $P_{\max}$
$S_i$	[m]	Station i
$S_{\max}$	[m]	Station des lokalen Maximums des Anstiegs m
$H_i$	[m]	Höhe der Straße an der Station i

Die ermittelte Sichtschattentiefe kann anschließend mit der kritischen Sichtschattentiefe ( $SST_{\text{krit}} = 0,75$  m) verglichen werden. Der hier entwickelte Algorithmus gibt letztlich den Wert „true“ zurück, wenn ausgehend von der Augstation  $S_A$  an mindestens einer Station  $S_i$  ( $S_{\max} < S_i < S_2$ ) eine kritische Sichtschattentiefe von  $SST \geq 0,75$  m vorhanden ist. Andernfalls wird der Wert „false“ ausgegeben. Besteht kein Sichtschatten, wird ein „Null“-Feld vorgesehen. Diese Berechnungen werden richtungsgetreut für alle möglichen Augstationen (Stationsabstand  $\Delta S = 5,00$  m) durchgeführt.

### Detektierung kritischer Sichtschattenbereiche

Kritische Sichtschattenbereiche liegen vor, wenn der nicht einsehbare Teil des Abschnitts ( $SST \geq 0,75 \text{ m}$ ) über eine Fahrstrecke von mindestens 75 m vorhanden ist (FGSV 2012a). Der Algorithmus prüft dieses Kriterium und berechnet die Augstationen, bei der kritische Sichtschattentiefen erstmals/letztmalig auftreten.

ADAMI (2017) nutzte diesen Algorithmus zur Detektierung kritischer Sichtschattenbereiche für seine Streckenvorauswahl und stellte dabei hohe Übereinstimmungen zwischen den Ergebnissen des Algorithmus und den Berechnungen des Straßenentwurfsprogramms CARD/1 fest.

#### 3.4.6 Detektierung verdeckter Kurvenbeginne

Ein verdeckter Kurvenbeginn liegt vor, wenn aus einer Entfernung von 75 m vor Kurvenbeginn eine Richtungsänderung der Straße von 3,5 gon (im Lageplan) nicht einsehbar ist (vgl. Ziffer 2.2.2). Diese Kriterien können anhand der DA 106 (Lageplandaten) und des Höhenverlaufs der Achskleinpunkte geprüft werden. Die Ermittlung von verdeckten Kurvenbeginnen gliedert sich dazu in zwei Arbeitsschritte:

1. Berechnung der Stationen, bei denen eine Richtungsänderung im Lageplan von  $\Delta\alpha = 3,5 \text{ gon}$  vorliegt (richtungsgetreunt) und
2. Prüfung auf Sichtbarkeit der berechneten Stationen.

#### Ermittlung der maßgebenden Stationen

Es werden zunächst die Richtungsänderungswinkel  $\alpha_i$  für die Achselemente Kreisbogen (vgl. Gl. 3-10) und Klothoide (vgl. Gl. 3-11) bestimmt.

$$\alpha_i = \frac{200 \text{ gon} * b_i}{\pi * R_i} \quad \text{Gl. 3-10}$$

$\alpha_i$	[gon]	Richtungsänderungswinkel des Kreisbogens i
$b_i$	[m]	Länge des Kreisbogens i
$R_i$	[m]	Radius des Kreisbogens i

$$\alpha_i = \frac{100 \text{ gon} * A_i^2}{\pi * R_i^2} \quad \text{Gl. 3-11}$$

$\alpha_i$	[gon]	Richtungsänderungswinkel der Klothoide i
$A_i$	[m]	Klothoidenparameter der Klothoide i
$R_i$	[m]	Stoßradius zur Klothoide i

Im nächsten Schritt werden die Stationen ermittelt, bei denen eine Richtungsänderung von  $\Delta\alpha = 3,5 \text{ gon}$  vorliegt. Dazu sind die in Tab. 3-4 dargestellten Elementfolgen zu beachten. Die Formel zur Berechnung der maßgebenden Stationen hängt von der Elementfolge und der Richtungsänderung der jeweiligen Elemente ab. Die Bedingung in der Spalte „Richtungsänderung“ bezieht sich auf das fett gedruckte Achselement (Spalte „Elementfolge“). Hat die Klothoide einen Parameter von  $A \geq 300 \text{ m}$ , wird entsprechend den Forderungen der RAL (FGSV 2012a) eine einsehbare Länge der Klothoide von  $L = 100 \text{ m}$  als maßgebend festgelegt.

Die Ermittlung der Stationen, bei denen eine Richtungsänderung im Lageplan von  $\Delta\alpha = 3,5 \text{ gon}$  vorliegt, erfolgt richtungsgetreuen. Weitere Richtungsänderungen desselben Richtungssinns (z. B. bei Eilinien) sowie Kurven mit Richtungsänderungen von  $\Delta\alpha < 3,5 \text{ gon}$  werden nicht geprüft.

Tab. 3-4: Formeln zur Berechnung der maßgebenden Stationen in Abhängigkeit von den Elementfolgen

Elementfolge	Richtungsänderung	Formel zur Berechnung der Stationen $S_{\Delta\alpha}$
G-R-G G-R-R-G	$\Delta\alpha \geq 3,5 \text{ gon}$	$S_{\Delta\alpha} = \frac{3,5 \text{ gon} * \pi * R_i}{200 \text{ gon}} + S_{\text{KB}i}$
G-A-R-A-G G-A-R-A-A-R-A-G	$\Delta\alpha \geq 3,5 \text{ gon}$	$S_{\Delta\alpha} = \sqrt{\frac{3,5 \text{ gon} * \pi * A_i^2}{100 \text{ gon}}} + S_{\text{KB}i}$
G-A-R-A-G G-A-R-A-A-R-A-G	$\Delta\alpha < 3,5 \text{ gon}$	$S_{\Delta\alpha} = \frac{(3,5 \text{ gon} - \alpha_{Ai}) * \pi * R_i}{200 \text{ gon}} + S_{\text{KB}i}$
$A \geq 300 \text{ m}$		$S_{\Delta\alpha} = 100 \text{ m} + S_{\text{KB}i}$

$S_{\Delta\alpha}$	[m]	Station, bei der eine Richtungsänderung von $\Delta\alpha = 3,5 \text{ gon}$ vorliegt
$S_{\text{KB}i}$	[m]	Station des Kurvenbeginns der Kurve i
$R_i$	[m]	Radius der Kurve i
$A_i$	[m]	Parameter der ersten Klothoide (in Betrachtungsrichtung) der Kurve i
$\alpha_{Ai}$	[gon]	Richtungsänderungswinkel der ersten Klothoide (in Betrachtungsrichtung) der Kurve i

### Prüfung auf Sichtbarkeit der maßgebenden Richtungsänderungen

Gemäß den Anforderungen der RAL (FGSV 2012a) wird die Sichtbarkeit der maßgebenden Richtungsänderung (Station  $S_{\Delta\alpha}$ ) aus einer Entfernung von 75 m (Station  $S_A$ ) vor Kurvenbeginn geprüft. Dazu wird der Anstieg vom Augpunkt zur Straßenoberfläche berechnet.

$$m_i = \frac{H_{\Delta\alpha} - (H_A + \text{Aughöhe})}{S_{\Delta\alpha} - S_A} \quad \text{Gl. 3-12}$$

$m_i$	[-]	Anstieg des Sichtstrahls zur Kurve i
$H_{\Delta\alpha}$	[m]	Höhe der Straße an der Station $S_{\Delta\alpha}$
$H_A$	[m]	Höhe der Straße an der Augstation $S_A$
$S_{\Delta\alpha}$	[m]	Station der maßgebenden Richtungsänderung der Kurve i
$S_A$	[m]	Augstation (75 m vor Kurvenbeginn)
Aughöhe	[m]	gemäß Modell RAL (FGSV 2012a): $H = 1,00 \text{ m}$

Mittels der Geradengleichung zwischen den Punkten  $P_A$  und  $P_{\Delta\alpha}$  können die Höhen des Sichtstrahls an den Stationen  $S_i$  ( $S_A < S_i < S_{\Delta\alpha}$ ) berechnet werden (vgl. Abb. 3-8).

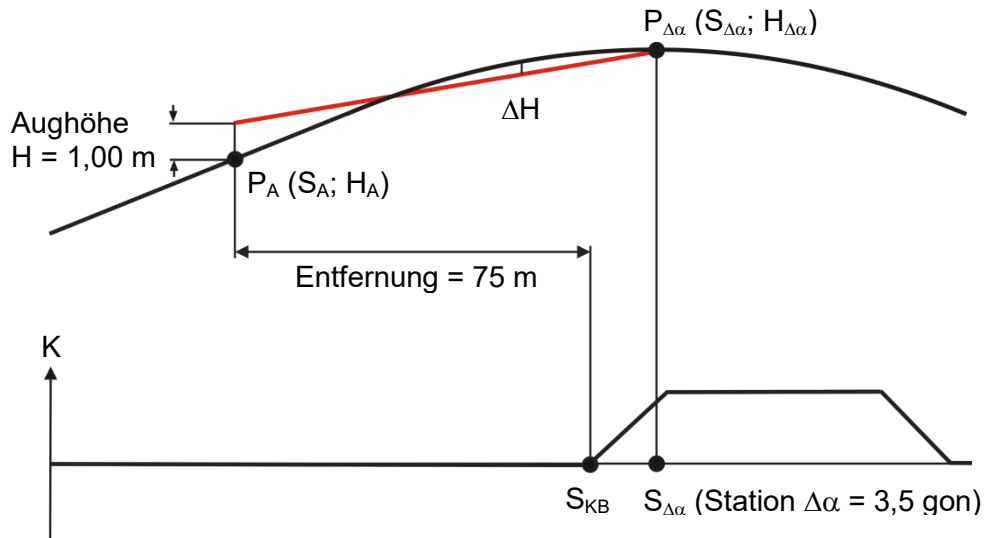


Abb. 3-8: Prinzipskizze zur Ermittlung von verdeckten Kurvenbeginnen

Der Punkt der maßgebenden Richtungsänderung  $P_{\Delta\alpha}$  ist sichtbar, wenn die Differenz  $\Delta H_i$  aus der Höhe des Sichtstrahls zu der Höhe der Straße stets positiv ist.

$$\Delta H_i = H_{Gi} - H_{Si} \quad \text{Gl. 3-13}$$

$\Delta H_i$	[m]	Höhendifferenz an der Station $S_i$
$H_{Gi}$	[m]	Höhe des Sichtstrahls an der Station $S_i$
$H_{Si}$	[m]	Höhe der Straße an der Station $S_i$

Sind negative Werte  $\Delta H_i$  vorhanden, vermerkt der Algorithmus letztlich die Station der maßgebenden Richtungsänderung  $S_{\Delta\alpha}$  mit der entsprechenden Richtung als verdeckten Kurvenbeginn.

Die Ergebnisse des Programms wurden an ausgewählten Streckenabschnitten geprüft (LINKE 2016). Als Referenzsoftware wurde das Straßenentwurfsprogramm CARD/1 herangezogen. Mithilfe des Moduls „Sichtweite berechnen“ können verdeckte Kurvenbeginne nach dem Schema von ZIMMERMANN (2001) in einem Sichtweitenband dargestellt werden. Auf insgesamt 72 Beispielstrecken (196 km) ermittelte der Algorithmus 310 verdeckte Kurvenbeginne. CARD/1 berechnete 300 verdeckte Kurvenbeginne. Dabei gab es insgesamt 241 Übereinstimmungen. LINKE (2016) begründet diese Differenz mit den unterschiedlichen Berechnungsverfahren der beiden Programme (Höhenangaben der Kleinpunktfolgen vs. angenäherte Höhenplanelemente im CARD/1).



### 3.5 Analyse des Unfallgeschehens

#### 3.5.1 Kenngrößen der Unfallanalyse

Der Einfluss der Merkmalsausprägungen auf die Verkehrssicherheit wird anhand von Unfalldaten qualifiziert bzw. quantifiziert.

Unfälle werden entsprechend der Verwaltungsvorschrift VwV-StVO zu § 44 polizeilich erfasst. Diese Erhebungen werden in (elektronischen) Unfalltypensteckkarten aufbereitet. Zu Auswertungszwecken können die Straßenverkehrsunfälle u. a. hinsichtlich

- der Unfallschwere (Unfallkategorie),
- der Konfliktsituation (Unfalltyp),
- des Unfallablaufs (Unfallart) und
- der Charakteristik der Unfallstelle

klassifiziert werden. Die jeweiligen Klassifizierungen sind im Anhang C dargestellt.

Die Verkehrssicherheit kann durch die Anzahl und Schwere von Straßenverkehrsunfällen beschrieben werden (FGSV 2012c). Dazu werden absolute und relative Unfallkenngrößen gebildet.

#### Absolute Unfallkenngrößen

Die **Anzahl der Unfälle** (häufig unterschieden nach den Unfallkategorien) wird zumeist genutzt, um regionale, örtliche oder zeitliche Bereiche einzuschätzen (GDV 2003).

Die Anzahl und Schwere der Unfälle werden in den **Unfallkosten** zusammengefasst. Sie beziffern die volkswirtschaftlichen Verluste durch Straßenverkehrsunfälle. Sie berechnen sich aus der Unfallanzahl und dem entsprechenden Kostensatz nach Gl. 3-14.

$$UK = \sum_{i=1}^n n_i * KS_i \quad \text{Gl. 3-14}$$

UK [€] Unfallkosten

$n_i$  [-] Unfallanzahl differenziert nach der Unfallkategorie

$KS_i$  [€] Kostensatz der entsprechenden Unfallkategorie (vgl. Anhang C - Tab. C-1)

#### Relative Unfallkenngrößen

Gemeinsame Bezugsgrößen ermöglichen den Vergleich verschiedener Streckenabschnitte hinsichtlich der Verkehrssicherheit. Dazu werden i. A. die Streckenlänge und die Fahrleistung<sup>12</sup> herangezogen.

Die **Unfalldichte** berücksichtigt die Abschnittslänge und den Betrachtungszeitraum und ist somit ein Maß für die Unfallhäufigkeit auf einer Strecke (Unfälle pro Kilometer und Jahr). Sie wird verwendet, um unfallauffällige Bereiche zu klassifizieren bzw. zu lokalisieren oder um Rangfolgen im Zuge der Örtlichen Unfalluntersuchung zu bilden.

<sup>12</sup> Die Fahrleistung ergibt sich aus dem Produkt von Abschnittslänge und Verkehrsbelastung.

Die **Unfallkostendichte** beziffert die durchschnittlichen volkswirtschaftlichen Kosten durch Verkehrsunfälle auf einem Kilometer Länge des Straßenbereichs (Gl. 3-15).

$$UKD = UK / (1000 * L * t) \quad \text{Gl. 3-15}$$

UKD	[1000 €/(km*a)]	Unfallkostendichte
UK	[€]	Unfallkosten
L	[km]	Länge des Untersuchungsabschnitts
t	[a]	Betrachtungszeitraum

Die **Unfallrate** beschreibt das fahrleistungsbezogene Risiko, in einen Unfall verwickelt zu werden. Aufgrund des Bezugs zur Verkehrsbelastung können verschiedene Streckenabschnitte hinsichtlich der Verkehrssicherheit miteinander verglichen werden. Sie berechnet sich nach Gl. 3-16.

$$UR = \frac{10^6 * n}{365 * DTV * L * t} \quad \text{Gl. 3-16}$$

UR	[U/10 <sup>6</sup> Kfz*km]	Unfallrate
n	[-]	Unfallanzahl
DTV	[Kfz/24h]	durchschnittlicher täglicher Verkehr
L	[km]	Länge des Untersuchungsabschnitts
t	[a]	Betrachtungszeitraum

Die **Unfallkostenrate** beziffert zudem den durchschnittlichen volkswirtschaftlichen Verlust, der bei einer bestimmten Fahrleistung auf einem Streckenabschnitt entsteht. Dies ermöglicht, auch die Schwere der Unfälle des betreffenden Streckenabschnitts zu beurteilen.

$$UKR = \frac{1000 * UK}{365 * DTV * L * t} \quad \text{Gl. 3-17}$$

UKR	[€/1000 Kfz*km]	Unfallkostenrate
UK	[€]	Unfallkosten
DTV	[Kfz/24h]	durchschnittlicher täglicher Verkehr
L	[km]	Länge des Untersuchungsabschnitts
t	[a]	Betrachtungszeitraum

Bei großen Kollektiven (Anzahl U(P) ≥ 100) besteht die Möglichkeit, die Unfallkostensätze der Verunglücktenstruktur des Unfallkollektivs anzupassen. Dies bildet örtliche Besonderheiten/Strukturabweichungen besser ab, ist allerdings nicht Ziel der Arbeit. Die Verwendung von pauschalen Unfallkostensätzen erlaubt es zudem, die Ergebnisse mit anderen Untersuchungen zu vergleichen.

### 3.5.2 Netzzuordnung der Unfälle

Straßenverkehrsunfälle werden i. A. über elektronische Unfalltypensteckkarten (EUSka) verwaltet. Die Lage der Unfälle wird dabei über die Koordinaten (Rechtswert, Hochwert) referenziert. In einigen Bundesländern werden die Unfälle zudem über Algorithmen und Prüfverfahren dem Straßennetz (VNK, NNK, nk\_station) zugeordnet. Eine Netzzuordnung der Unfälle liegt somit bereits teilweise vor.

Bei fehlendem Bezug zum Straßennetz werden die Unfälle über räumliche Datenbankabfragen zugeordnet. Der Algorithmus sucht Unfälle in einem Abstand von maximal 50 m zum Geometrieobjekt (Netznotenabschnitt der Straße) und projiziert diesen rechtwinklig auf die Straße. Anhand des Verhältnisses von Längenanteil des projizierten Punktes zur Gesamtlänge des Netznotenabschnitts kann die Station des Unfalls bestimmt werden. Sind Mehrfachzuordnungen möglich (z. B. in Knotenpunktbereichen), wird der kürzeste Abstand des Unfalls zur Straße gewählt. An diesen Stellen sind fehlerhafte Zuordnungen denkbar. Diese Bereiche sind jedoch nicht Bestandteil der Unfallauswertungen (vgl. Ziffer 3.4.1). Es kann demnach davon ausgegangen werden, dass auf den für diese Untersuchungen maßgebenden Straßenabschnitten die Unfälle richtig zugeordnet sind.

### 3.5.3 Spezifizierung der Unfalldaten

Zur Unfallanalyse haben sich Untersuchungszeiträume von drei Jahren bewährt. Damit können auch kritische Bereiche von Unfällen mit (schwerem) Personenschaden erkannt werden (FGSV 2012c). Die Unfalldaten werden in elektronischen Unfalltypensteckkarten verwaltet (vgl. Ziffer 3.5.1) und können aktuell abgefragt werden. Zur Auswertung werden die Unfälle bzw. Unfallkenngrößen den entwurfstechnischen Parametern der Straße zugeordnet. Der stetige Wandel des Straßennetzes durch Um- und Ausbaumaßnahmen begrenzt allerdings die Aktualität der Unfalldaten. Daher wird zur Unfallanalyse ein 3-Jahres-Zeitraum gewählt, der im Wesentlichen dem Zeitpunkt der messtechnischen Erfassung der jeweiligen Strecken/Forschungsprojekte entspricht.

Im Vordergrund der Untersuchung stehen die Abschnitte der freien Strecke. Als sogenannte „Streckenunfälle“ zählen Unfälle des Typs 1 (Fahrerunfall), 6 (Unfälle im Längsverkehr) und 7 (Sonstiger Unfall). Ein Unfall wird als „Sonstiger Unfall“ bezeichnet, wenn er sich nicht einem anderen Unfalltyp zuordnen lässt. Die Auswertung der Sondermerkmale zeigt, dass auf Landstraßen der Unfalltyp 7 vorwiegend durch Wildunfälle geprägt ist. Diese werden i. A. durch die örtlichen und regionalen Gegebenheiten bestimmt und weniger durch die geometrische Gestaltung der Straße. In Abhängigkeit vom betrachteten Merkmal werden für die folgenden Untersuchungen daher nur Unfälle des Typs 1 und/oder des Typs 6 herangezogen.

Unfälle werden nach ihrer Schwere in die Kategorien 1 bis 6 unterteilt (vgl. Anhang C). Jedoch konnten für einige Bundesländer Unfälle der Kategorie 5 (Unfälle mit leichtem Sachschaden) nicht bereitgestellt werden. Ein Unfall mit Sachschaden wird der Kategorie 6 zugeordnet, wenn der Fahrzeugführer unter Einfluss berauschender Mittel stand. Die Fahrtüchtigkeit des Fahrzeugführers war folglich beeinträchtigt. Daher wird diese Unfallkategorie nicht berücksichtigt. Bei den Auswertungen werden somit einheitlich nur die Unfallkategorien 1 bis 4 einbezogen.

Das Bundesland Bayern definiert abweichend von den Festlegungen der FGSV für Unfälle mit Sachschaden die Unfallkategorie 7. Eine netzweit eindeutige Differenzierung in Unfälle mit schweren und leichten Sachschaden ist damit nicht möglich. Die Unfallkosten werden daher anhand der Kostensätze  $KS_U$  für U(SP), U(LV) und U(SS) berechnet (vgl. Anhang C).

Die Unfalldaten stammen aus verschiedenen Jahren entsprechend dem Stand der geometrischen Erfassung des Straßennetzes. Zur Auswertung wird darauf geachtet, dass jeweils ein Betrachtungszeitraum von drei Jahren zugrunde liegt.

### 3.5.4 Berechnung der relativen Unfallkenngrößen

Relative Unfallkenngrößen ermöglichen es, verschiedene Streckenabschnitte hinsichtlich der Verkehrssicherheit miteinander zu vergleichen (vgl. Ziffer 3.5.1). Kurze Straßenabschnitte ( $L < 1.000$  m) können allerdings zu sehr hohen und nicht plausiblen Kenngrößen führen (vgl. u. a. EBERSBACH/SCHÜLLER 2007). Die Verteilung der relativen Kenngrößen bezogen auf die Netzabschnittslänge kann in einem Diagramm aufbereitet werden. Bei einem sprunghaften Anstieg bietet es sich an, einen fiktiven Mindestwert der Abschnittslänge zur Berechnung der relativen Unfallkenngrößen festzulegen (möglichst nahe an der Grenze des sprunghaften Anstiegs) und die kürzeren Abschnitte auf diesen Wert hin zu normieren.

Die Verteilung der relativen Unfallkenngrößen (Unfallrate und Unfallkostenrate) des vorliegenden Streckenkollektivs ist in Abb. 3-9 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass selbst die niedrigste Längenklasse (400 m - 600 m) keine deutlichen Unterschiede in den Unfallkenngrößen aufweist. Eine Normierung kurzer Abschnitte ist daher nicht erforderlich.

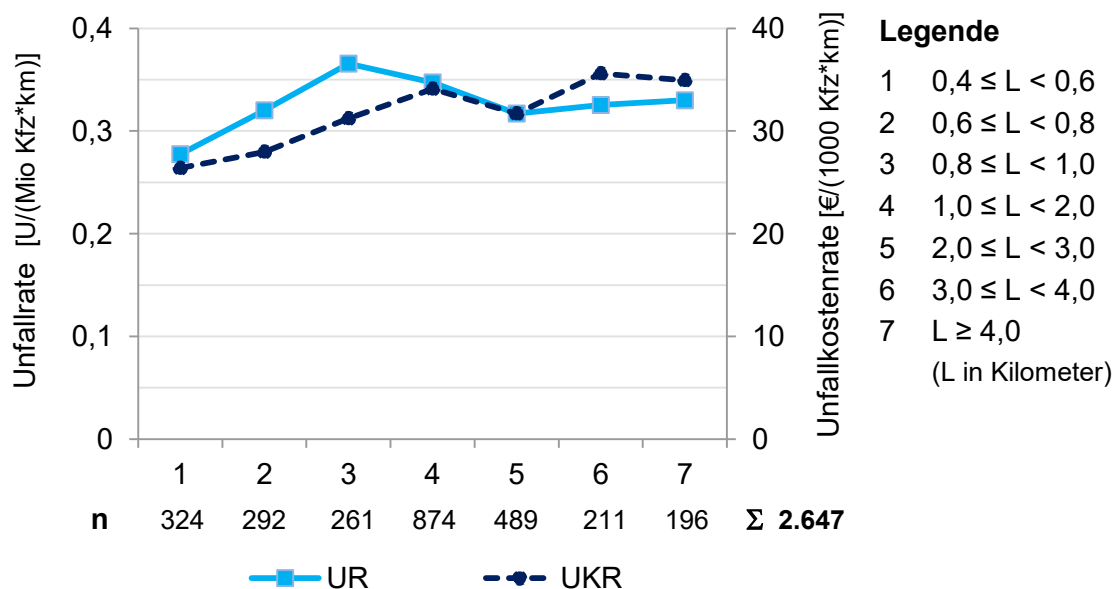


Abb. 3-9: Verteilung der relativen Unfallkenngrößen differenziert nach der Abschnittslänge (Unfalltyp 1 und 6, Unfallkategorien 1 bis 4)

### 3.5.5 Bildung von Untersuchungskollektiven

Grundlage dieser Untersuchungen bilden Messdaten, die im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben erhoben wurden. Die Charakteristika der jeweiligen Streckenkollektive unterscheiden sich zum Teil sehr deutlich (vgl. Ziffer 4.1). Daher erfolgen die Auswertungen auch differenziert nach verschiedenen Kollektivkombinationen. Dabei ist zu beachten, dass die Kollektive 1 und 5 einen vergleichsweise geringen Streckenanteil am Gesamtkollektiv aufweisen. Werden die Kollektive nicht extra benannt, liegt den Auswertungen das gesamte Streckenkollektiv zugrunde.

### 3.5.6 Fahrbahnbreite

Die Fahrbahnbreiten des Streckenkollektivs werden in acht Klassen eingeteilt (Schrittweite: 50 cm). Die Klassenmitte wird dabei so gewählt, dass sie den üblichen Fahrbahnbreiten des Straßenentwurfs entspricht. Damit ergeben sich die in Tab. 3-5 dargestellten Bereiche. Eine weitere niedrigere Klasse ( $B < 4,75$  m) wäre aufgrund der Verteilung der Fahrbahnbreiten denkbar (vgl. Abb. 4-2). Es hat sich allerdings gezeigt, dass bei Straßen mit schmalen Querschnitten die Fahrbahnbreiten zunehmend „springen“ (keine einheitliche Fahrbahnbreite über den Straßenabschnitt). Eine weitere Differenzierung erscheint somit als nicht zielführend.

Das Streckenkollektiv 1 (Kreisstraßennetz Mittelsachsen) wird wegen der sehr schmalen Querschnittsabmessungen (vgl. Abb. 4-2) gesondert ausgewertet.

Tab. 3-5: Klassifizierung der Fahrbahnbreite

Klasse	Klassenbreite [m]	Mittelwert der Kollektive 2 - 5 [m]	Stichprobe [-]
5,00 m	$B < 5,25$	4,88	168
5,50 m	$5,25 \leq B < 5,75$	5,54	335
6,00 m	$5,75 \leq B < 6,25$	5,99	759
6,50 m	$6,25 \leq B < 6,75$	6,47	536
7,00 m	$6,75 \leq B < 7,25$	6,97	286
7,50 m	$7,25 \leq B < 7,75$	7,49	244
8,00 m	$7,75 \leq B < 8,25$	8,01	127
8,50 m	$B \geq 8,25$	8,68	85

Es werden die Mittelwerte der Unfallrate (Gl. 3-16) und der Unfallkostenrate (Gl. 3-17) für die jeweiligen Breitenklassen gegenübergestellt. Dazu werden Unfälle des Typs 1 und/oder des Typs 6 berücksichtigt.

Diese relativen Unfallkenngrößen (UR und UKR) werden herangezogen, um die Verkehrssicherheit verschiedener Streckenabschnitte, die sich in Länge und Verkehrsbelastung unterscheiden, zu vergleichen und einzuschätzen. Die Fahrleistung stellt folglich eine Expositionsgröße dar. Dabei wird ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der Unfalldichte und der Fahrleistung unterstellt (Unabhängigkeit der Expositionsgröße). VIETEN U. A. (2010) haben für ihr Streckenkollektiv diese direkte Abhängigkeit geprüft. Sie konnten keinen linear-proportionalen Zusammenhang zwischen der Unfallhäufigkeit und der Fahrleistung feststellen. Vielmehr hat sich gezeigt, dass mit zunehmender Fahrleistung die Unfallhäufigkeit nur unterproportional ansteigt. Die Linearitätsbedingung konnte allerdings für Teilkollektive getrennt nach der Fahrbahnbreite nachgewiesen werden.

Diese Abhängigkeit wurde für das vorliegende Streckenkollektiv nach einer ähnlichen Systematik geprüft. Der annähernd linear-proportionale Zusammenhang zwischen der Unfalldichte und der Fahrleistung - differenziert nach den Fahrbahnbreiten - hat sich auch in dieser Arbeit eingestellt (vgl. Anhang D).

Beim gesamten Kollektiv lässt sich ähnlich wie bei VIETEN U. A. (2010) der Zusammenhang am besten durch eine Logarithmusfunktion ( $R^2 = 0,92$ ) abbilden (vgl. Abb. 3-10, dunkelblau-gestrichelte Trendlinie). Es ist zudem weiterhin möglich, die Abhängigkeit von Unfallhäufigkeit und Fahrleistung des gesamten Kollektivs über einen linearen Ansatz mit einer ebenfalls guten Bestimmtheit ( $R^2 = 0,80$ ) zu beschreiben (vgl. Abb. 3-10, hellblau-durchgezogene Trendlinie). Es wird daher für die weiteren Untersuchungen die Expositionsgröße (Fahrleistung) auch bei nicht differenzierter Betrachtung (keine Unterteilung der Fahrbahnbreiten) als unabhängig von deren Wertebereich angenommen.

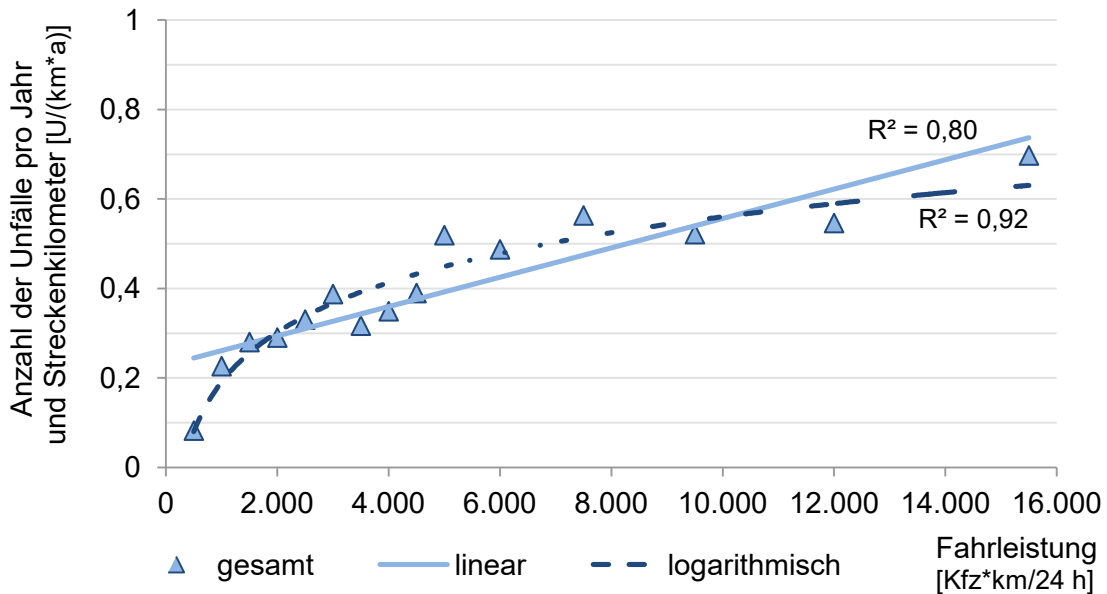


Abb. 3-10: Prüfung der Linearitätsbedingung zwischen der Unfalldichte und der durchschnittlich täglichen Fahrleistung

### 3.5.7 Kurvenradien und Elementfolgen

In der Literatur haben sich kleine Kurvenradien sowie ungünstige Elementfolgen als sicherheitskritisch herausgestellt (vgl. Ziffer 2.1.2). Die sicherheitstechnischen Untersuchungen werden daher nach der Größe einzelner Kurvenradien sowie nach dem Verhältnis aufeinanderfolgender Elemente durchgeführt.

Dazu werden die jeweiligen Kriterien wiederum klassifiziert und die Mittelwerte der maßgebenden relativen Unfallkenngrößen gegenübergestellt. Allerdings wird abweichend von anderen Untersuchungen nicht die Abschnittslänge als Bezugsgröße gewählt. Die Länge steht nach der Gl. 3-16 und der Gl. 3-17 im Divisor. Bei kurzen Kurvenradien - also bei Längen von  $L \ll 1$  km - würden die relativen Unfallkenngrößen unrealistisch hohe Werte annehmen. Das würde vorwiegend kleine Radien betreffen (vgl. Tab. 3-6). Daher wird als Bezugsgröße das Element (also die Kurve) festgelegt und die Länge in den aufgeführten Gleichungen auf den Wert „1“ gesetzt.

Die Auswertungen erfolgen zudem - entsprechend den Schlussfolgerungen aus der Literatur (vgl. Ziffer 2.1.7) - auch differenziert nach einer Mindestkurvenlänge von  $L = 50$  m und unterschiedlichen Fahrbahnbreiten.

Dabei sind nur Unfälle maßgebend, die im Zusammenhang mit dem Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug stehen (Unfalltyp 1). Der Ort des Kontrollverlustes ist von

der Polizei als Unfallposition zu erfassen. Allerdings ist diese Stelle im Nachgang meist schwer festzustellen. Weiterhin hat sich herausgestellt, dass Polizeibeamte auch teilweise die endgültige Lage des Fahrzeugs als Unfallort aufnehmen. Dies kann teils deutlich hinter dem unfallauslösendem Element liegen (vgl. Abb. 3-11). Es ist demnach zu diskutieren, welche Fahrurfälle bei der Sicherheitsanalyse von Kurven und Kurvenfolgen zu berücksichtigen sind.

### Zuordnung von Fahrurfällen zu Kurven

Unfälle können über verschiedene Merkmale genauer beschrieben werden. Das Merkmal „Charakteristik der Unfallstelle“ spezifiziert die örtlichen Randbedingungen eines Unfalls (vgl. Anhang C). Die Ziffer „6“ kennzeichnet dabei die räumliche Nähe eines Unfalls zu einer Kurve. Die in Abb. 3-11 dargestellten Fahrurfälle sind alle mit diesem Attribut versehen, wobei lediglich der westliche Unfall direkt in der Kurve lokalisiert wurde. Die Unfälle sind mit der Stationierungsrichtung beschriftet (1: aufsteigend, 2: absteigend). Damit ist vermutlich auch noch der östliche Unfall mit einem Abstand von fast 100 m der westlichen Kurve zuzuordnen.

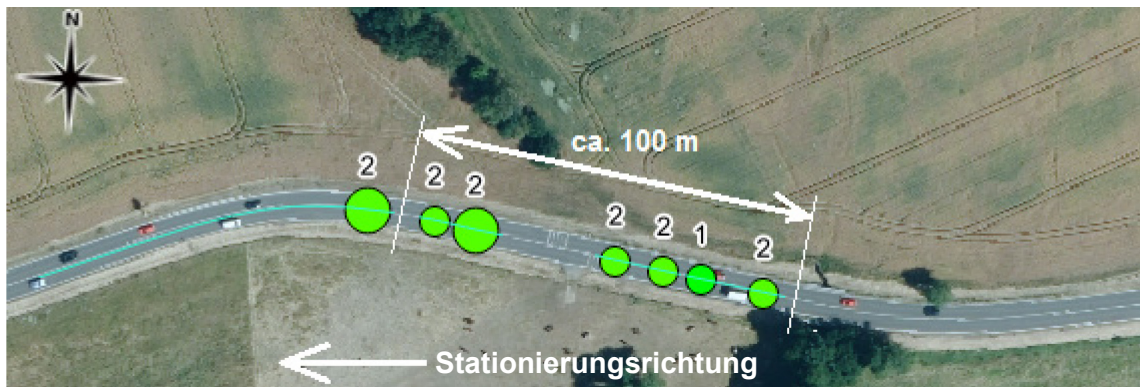


Abb. 3-11: Fahrurfälle mit der Charakteristik der Unfallstelle „Kurve“ auf einem Streckenabschnitt der B 6 in Sachsen (Luftbild: <https://geodienste.sachsen.de>)

Diese Distanzen sind einerseits mit den charakteristischen Bewegungsvorgängen bei Unfällen dieses Typs und den dadurch zurückgelegten Entfernungen zu begründen. Andererseits können auch Ungenauigkeiten bei der Verortung des Unfalls diesen Wert beeinflussen.

Zur Festlegung einer plausiblen Grenze, bei denen die Fahrurfälle noch der zurückliegenden Kurve zuzuschreiben sind, wurde der Anteil des Merkmals „Charakteristik der Unfallstelle“ in Abhängigkeit von der Entfernung zum Kurvenende geprüft. Abb. 3-12 zeigt das Verhältnis vom Attribut „Kurve“ (rot) zu „ungleich Kurve“ (grau). Es ist zu erkennen, dass selbst bei Unfällen, die direkt in der Kurve verortet wurden, das Attribut „Kurve“ nur zu 69 % als charakteristisches Merkmal der Unfallstelle erfasst wurde (Unfälle mit Personenschaden). Ein vergleichbarer Anteil stellt sich bei Entfernungen von bis zu 100 m ein. Bei größeren Entfernungen nimmt der Anteil um mehr als 20 % sprunghaft ab.

Es werden demnach bei den folgenden sicherheitstechnischen Untersuchungen zum Kurvenradius und den Elementfolgen nur die Fahrurfälle berücksichtigt, die direkt in der Kurve liegen oder einen maximalen Abstand von 100 m zum Kurvenende aufweisen. Die Lage des Unfalls zur Kurve kann über das Merkmal „Fahrtrichtung“ ermittelt werden. Unfälle vor der Kurve bleiben damit bewusst unberücksichtigt.

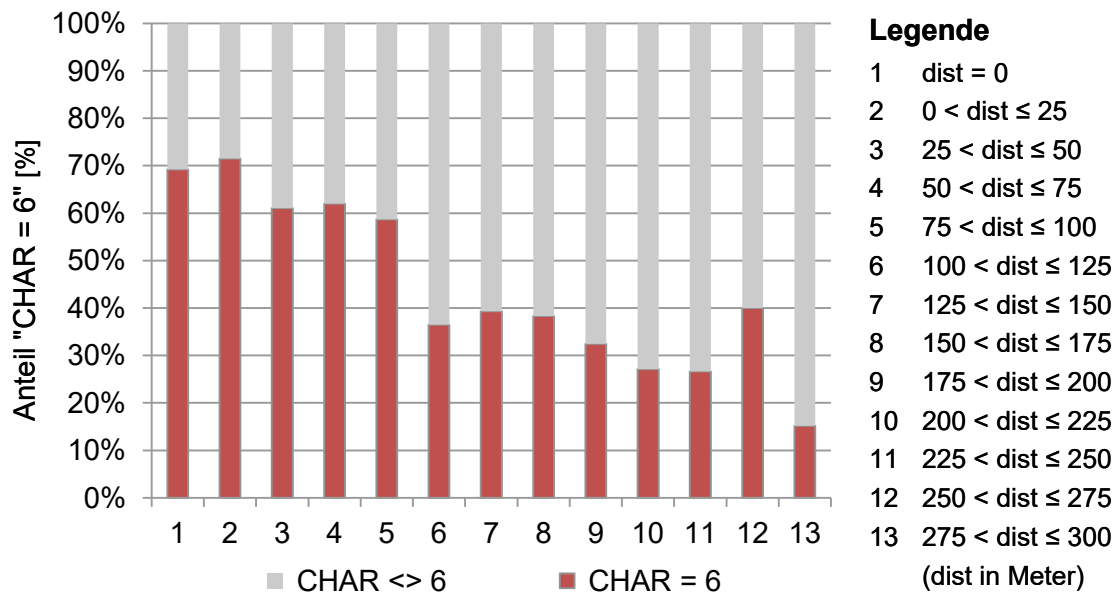


Abb. 3-12: Anteil der Fahrurfälle (Unfallkategorie 1 bis 3) mit der Charakteristik der Unfallstelle „Kurve“ in Abhängigkeit von der Entfernung zum Kurvenende

### Kurvenradius

Die Kurvenradien werden ähnlich wie bei LEUTZBACH/ZOELLMER (1989) klassifiziert, wobei das vorliegende (große) Kollektiv eine feinere Klassenbreite erlaubt. Die Bereichsgrenzen werden so gewählt, dass die Klassenmitte einen runden Wert ergibt. Radien von  $R \geq 1.100$  m werden in einer Klasse zusammengefasst. Damit ergeben sich die in Tab. 3-6 dargestellten 14 Klassen.

Tab. 3-6: Klassifizierung der Kurvenradien

Klasse	Klassenbreite [m]	Mittelwert [m]	mittlere Elementlänge [m]	Stichprobe [-]
50 m	$R < 75$	48	40	1.026
100 m	$75 \leq R < 125$	100	56	1.275
150 m	$125 \leq R < 175$	150	67	1.178
200 m	$175 \leq R < 225$	199	81	1.090
250 m	$225 \leq R < 275$	249	93	932
300 m	$275 \leq R < 325$	300	106	859
350 m	$325 \leq R < 375$	350	115	731
400 m	$375 \leq R < 425$	400	128	606
450 m	$425 \leq R < 475$	449	129	529
500 m	$475 \leq R < 525$	499	146	528
600 m	$525 \leq R < 700$	606	153	1.258
800 m	$700 \leq R < 900$	792	164	863
1.000 m	$900 \leq R < 1.100$	994	182	684
>1.000 m	$R \geq 1.100$	3.091	203	2.293



## Elementrelationen

LIPPOLD (1997) untersuchte Geschwindigkeitsdifferenzen für die Elementfolgen Radius – Radius und Gerade – Radius und leitete daraus, abgesichert durch Unfalluntersuchungen, sichere Elementrelationen ab. Im Ergebnis wurden „gute“, „brauchbare“ und „zu vermeidende“ Bereiche formuliert, die auch in den Bildern 12 und 13 der RAL (FGSV 2012a) als Anforderungen für den Kurvenradius wiederzufinden sind. MAIER U. A. (2012) und BARK U. A. (2015) nutzten für ihre statistischen Unfallmodelle die Grenze des guten/brauchbaren Bereichs als Maßstab und definierten prozentuale Abweichungen in vier Stufen. Dabei stellte sich insbesondere die hohe Abweichung als signifikante (für die Verkehrssicherheit negative) Einflussgröße heraus (vgl. Ziffer 2.1.2). Die Spannweite der definierten Bereiche, also das Maß der jeweiligen prozentualen Abweichung, wurde (ingenieurtechnisch) frei gewählt.

Für diese Untersuchungen wird eine vergleichbare Systematik gewählt und somit die Grenze des guten/brauchbaren Bereichs der Elementrelationen als Maßstab herangezogen. Die Unfallkenngrößen werden für die in Tab. 3-7 aufgeführten Klassen der prozentualen Abweichung gegenübergestellt. Das Maß der Abweichung (Abw) wird nach Gl. 2-2 bestimmt.

Die Analyse des Unfallgeschehens zu den Elementrelationen erfolgt differenziert nach:

- (1) der Folge gegenseitig gekrümmter Kurven,
- (2) der Folge gleichsinnig gekrümmter Kurven und
- (3) Kurvenradien im Anschluss an Geraden.

Dabei wird sichergestellt, dass sich die Anforderungen der Relationen R-R und G-R nicht überlagern. Die Teilkollektive bestehen somit nur aus den Elementfolgen, bei denen der erforderliche Radius der jeweiligen Relation auch maßgebend (also größer) ist. Entsprechend den Forderungen der RAL (FGSV 2012a) werden bei den Auswertungen von (1) und (2) auch aufeinanderfolgende Kurven berücksichtigt, die eine Zwischengerade von  $L \leq 300$  m haben.

Tab. 3-7: Klassifizierung der Elementrelationen

Klasse	Klassenbreite [%]	Mittelwert [%]	Stichprobe (1) [-]	Stichprobe (2) [-]	Stichprobe (3) [-]
0 %	$Abw \leq 5$	-	7.225	4.368	5.465
10 %	$5 < Abw \leq 15$	10	387	214	426
20 %	$15 < Abw \leq 25$	20	345	259	446
30 %	$25 < Abw \leq 35$	30	384	301	474
40 %	$35 < Abw \leq 45$	40	402	274	504
50 %	$45 < Abw \leq 55$	50	374	297	491
> 50 %	$Abw > 55$	70	945	784	1.167

### 3.5.8 Kurvigkeit des Einzelbogens und Kurvigkeitsdifferenzen

Die Kurvigkeit des Einzelbogens und die Kurvigkeitsdifferenz sind ebenfalls Parameter des Lageplans, die zur Beschreibung/Klassifizierung von Kurven herangezogen werden können. Damit erfolgt

- die Unfallzuordnung,
- die Unfallspezifizierung (nur Unfalltyp 1) und
- die Berechnung der maßgebenden Unfallkenngrößen

analog zu der in Ziffer 3.5.7 beschriebenen Methode.

Die Parameter werden nach den in Ziffer 3.4.4 aufgeführten Gleichungen ermittelt und klassifiziert. Die Bereichsgrenzen werden dabei so gewählt, dass die Klassenmitte ca. runde „Hunderter“ ergibt. Die letzte Klasse enthält alle Werte, deren Kurvigkeit des Einzelbogens  $KU_E$  bzw. Kurvigkeitsdifferenz  $\Delta KU > 650 \text{ gon/km}^{13}$  sind.

Tab. 3-8: Klassifizierung der Kurvigkeit des Einzelbogens

Klasse	Klassenbreite [gon/km]	Mittelwert [gon/km]	Stichprobe [-]
30	$KU_E \leq 50$	31	1.982
100	$50 < KU_E \leq 150$	96	4.647
200	$150 < KU_E \leq 250$	195	2.580
300	$250 < KU_E \leq 350$	296	1.471
400	$350 < KU_E \leq 450$	395	866
500	$450 < KU_E \leq 550$	497	595
600	$550 < KU_E \leq 650$	601	444
>600	$R > 650$	1.277	1.253

Tab. 3-9: Klassifizierung der Kurvigkeitsdifferenzen

Klasse	Klassenbreite [gon/km]	Mittelwert [gon/km]	Stichprobe [-]
0	$\Delta KU \leq 50$	-53	11.186
100	$50 < \Delta KU \leq 150$	95	7.446
200	$150 < \Delta KU \leq 250$	196	3.456
300	$250 < \Delta KU \leq 350$	296	1.788
400	$350 < \Delta KU \leq 450$	396	1.071
500	$450 < \Delta KU \leq 550$	495	720
600	$550 < \Delta KU \leq 650$	600	441
> 600	$\Delta KU > 650$	1.324	1.461

<sup>13</sup> Eine Kurvigkeit des Einzelbogens von  $KU_E = 650 \text{ gon/km}$  entspricht ca. einem Kurvenradius von  $R = 85 \text{ m}$  mit einer Länge von  $L = 60 \text{ m}$ .

### 3.5.9 Sichtschattenbereiche

Die Sichtschattenbereiche werden nach der in Ziffer 3.4.5 beschriebenen Methode erfasst. Die einzelnen Berechnungsschritte wurden programmtechnisch umgesetzt. Dabei erfolgt keine Differenzierung in die Defizite Springen und Tauchen.

Die Unfallkenngrößen werden nach Gl. 3-16 und Gl. 3-17 für gesamte Straßenabschnitte und einzelne Sichtschattenbereiche<sup>14</sup> berechnet. Dazu werden Unfälle des Typs 1 und des Typs 6 berücksichtigt.

Der Algorithmus erfasst entsprechend den H ViSt (FGSV 2008a) den Stationsbereich des Fahrzeugs, bei dem im Folgenden ein kritischer Sichtschattenbereich auftritt. Der für den Verkehrsteilnehmer nicht einsehbare Bereich liegt folglich hinter dem ermittelten Stationsbereich. IFFERT (2013) definierte dazu in ihren Untersuchungen einen Pufferbereich von  $L = 300$  m, um das maßgebende Unfallgeschehen einzugrenzen. In der weiterführenden Literatur werden sonst keine Hinweise zur Größe solcher Bereiche genannt.

Anhand der prozentualen Verteilung der Unfalltypen (des vorliegenden Kollektivs) in Abhängigkeit von der Größe des Pufferbereichs kann ebenfalls keine geeignete Grenze abgeleitet werden (vgl. Tab. 3-10). Die absolute Unfallanzahl (bzw. die Differenz) mit zunehmenden Pufferbereich lässt hingegen zwei plausible Grenzen vermuten:

- Pufferbereich = 400 m  
Dieser Bereich entspricht dem Wert des lokalen Maximums der Unfallzunahme.
- Pufferbereich = 550 m  
Ab diesem Wert ist nur noch eine vergleichsweise geringe Zunahme der Unfälle festzustellen.

Für diese Untersuchungen wird eine Länge des Pufferbereichs von  $L = 400$  m nach dem ermittelten Stationsbereich festgelegt.

Tab. 3-10: Anzahl der Unfälle in Abhängigkeit von der Länge des Pufferbereichs bei Sichtschattenbereichen

Länge des Pufferbereichs [m]	Anzahl / Anteil Unfälle Typ 1	Anzahl / Anteil Unfälle Typ 6	Gesamtanzahl Unfälle	Differenz
250	270 / 72 %	104 / 28 %	374	-
300	298 / 72 %	117 / 28 %	415	41
350	333 / 71 %	135 / 29 %	468	53
400	374 / 72 %	146 / 28 %	520	52
450	402 / 72 %	157 / 28 %	559	39
500	429 / 72 %	169 / 28 %	598	39
550	459 / 72 %	180 / 28 %	639	41
600	471 / 71 %	191 / 29 %	662	23

<sup>14</sup> Die Länge als Bezugsgröße (zur Berechnung der relativen Unfallkenngrößen) wird hier auf den Wert „1“ gesetzt, da sowohl die Ausdehnung als auch der Wirkungsbereich kritischer Sichtschattenbereiche nur schwer einzugrenzen sind.

### 3.5.10 Verdeckter Kurvenbeginn

Die verdeckten Kurvenbeginne werden nach der in Ziffer 3.4.6 beschriebenen Methode richtungsgetreunt erfasst.

Im nächsten Schritt werden den so ermittelten Kurven in Abhängigkeit von der Richtung Fahrurfälle (nur Unfalltyp 1) zugeordnet (vgl. Abb. 3-13). Dabei werden die in Ziffer 3.5.7 beschriebenen Erkenntnisse zur Referenzierung von Fahrurfällen in bzw. nach Kurven berücksichtigt.

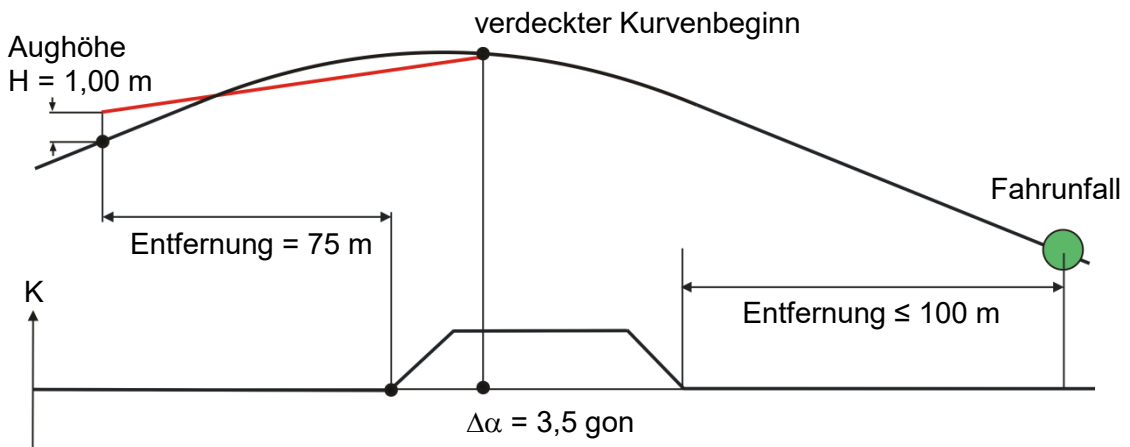


Abb. 3-13: Prinzipskizze zur Zuordnung von Fahrurfällen zu verdeckten Kurvenbeginnen

Die relativen Unfallkenngrößen (Unfallrate und Unfallkostenrate) werden analog zu Ziffer 3.5.9 nach Gl. 3-16 und Gl. 3-17 für gesamte Straßenabschnitte und einzelne verdeckte Kurvenbeginne<sup>15</sup> berechnet. Die Auswertungen erfolgen dabei u. a. differenziert nach der Richtungsänderung der Kurve. Die Richtungsänderung wird dazu in neun Klassen eingeteilt (vgl. Tab. 3-11).

Tab. 3-11: Klassifizierung des Richtungsänderungswinkels

Klasse	Klassenbreite [gon]	Mittelwert [gon]	Stichprobe [-]
5 gon	$3,5 < \alpha \leq 7,5$	5,5	545
10 gon	$7,5 < \alpha \leq 12,5$	9,8	512
15 gon	$12,5 < \alpha \leq 17,5$	14,9	356
20 gon	$17,5 < \alpha \leq 22,5$	19,9	258
25 gon	$22,5 < \alpha \leq 27,5$	24,8	211
30 gon	$27,5 < \alpha \leq 35$	30,9	227
40 gon	$35 < \alpha \leq 45$	39,5	187
50 gon	$45 < \alpha \leq 55$	49,6	111
> 50 gon	$\alpha > 55$	81,7	213

<sup>15</sup> Die Berechnung der relativen Unfallkenngrößen für die einzelnen verdeckten Kurvenbeginne erfolgt nach der in Ziffer 3.5.7 beschriebenen Besonderheit (Element als Bezugsgröße).

## 4 Einfluss ausgewählter Entwurfsmerkmale auf die Verkehrssicherheit

### 4.1 Darstellung des Streckenkollektivs

Die Datengrundlage für diese Untersuchungen bilden Straßen, die im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben mit speziellen Messfahrzeugen (vgl. Ziffer 3.3.2) befahren wurden. Zur Auswertung werden nur einbahnig zweistreifige Abschnitte der freien Strecke mit einer Mindestlänge von  $L_{\min} = 1.000$  m herangezogen (vgl. Ziffer 3.4.1). Damit ergibt sich das in Tab. 4-1 und Abb. 4-1 dargestellte Gesamtkollektiv mit 2.684 Straßenabschnitten und einer Gesamtlänge der freien Strecke von 6.524 km.

Tab. 4-1: Übersicht der Streckenkollektive

Nr.	Forschungsvorhaben	n [-]	L [km]
1	Kategorisierung der Kreisstraßen im Landkreis Mittelsachsen - Geometrische Aufnahme und entwurfstechnische Bewertung als Grundlage für die Erstellung eines Bauprogramms, LEHMANN/HEINE (2010)	73	122
2	Entwurfstechnische Bewertung des Grundnetzes im Land Brandenburg, LIPPOLD U. A. (2011b)	1.105	3.030
3	Bewertungsmodell für die Verkehrssicherheit von Straßen, MAIER U. A. (2012)	836	1.952
4	Erhaltungsstrategie für Staatsstraßen im Freistaat Sachsen, LERCH U. A. (2014)	597	1.246
5	Empfehlungen zur Vermeidung von Zusammenstößen mit dem Gegenverkehr auf Landstraßen, BARK U. A. (2015)	73	174
$\Sigma$		2.684	6.524

Die jeweiligen Streckenkollektive unterscheiden sich hinsichtlich Umfang und Baulast/Verbindungsfunktion. Diese können dabei grundsätzlich in gezielt ausgewählte Straßenabschnitte (Nr. 3 und 5) und allgemeine (Teil-)Netze (Nr. 1, 2 und 4) differenziert werden.

Das Kreisstraßennetz im Landkreis Mittelsachsen hat einen erschließenden Charakter (nahräumige Verbindungsbedeutung). Es ist vorwiegend durch schmale Querschnitte und eine angepasste Linienführung gekennzeichnet.

Das Grundnetz im Land Brandenburg (Bundes- und Landesstraßen) hat regionale und überregionale Verbindungsfunktionen und sichert damit die Anbindung an Mittel- und Oberzentren.

Bei der Wahl der Streckenabschnitte des Forschungsprojekts „Bewertungsmodell für die Verkehrssicherheit von Straßen“ wurde auf eine heterogene Verteilung der Querschnitte geachtet, die sich teilweise auch deutlich im Terraintyp unterscheiden (MAIER U. A. 2012). Der größte Anteil der Abschnitte entfällt dabei auf Straßen mit regionaler Verbindungsbedeutung.

Die Strecken des Staatsstraßennetzes im Freistaat Sachsen haben ebenfalls eine große Bandbreite hinsichtlich des Erscheinungsbildes (Querschnittsgestaltung und Linienführung). Es sind vorwiegend Straßen mit regionaler und nähräumiger Verbindungsfunktion.

Das fünfte Kollektiv umfasst Strecken (Bundes-, Landes-/Staats- und Kreisstraßen), die gezielt nach dem Unfallgeschehen (Unfälle mit Zusammenstößen im Begegnungsverkehr) ausgewählt wurden.

Auf den Untersuchungstrecken ereigneten sich in einem Zeitraum von drei Jahren insgesamt 6.339 Unfälle (Unfalltyp 1 und Unfalltyp 6, Unfallkategorien 1 bis 4) - davon 2.667 Unfälle mit Leichtverletzten, 1.642 Unfälle mit Schwerverletzten und 223 Unfälle mit Getöteten.

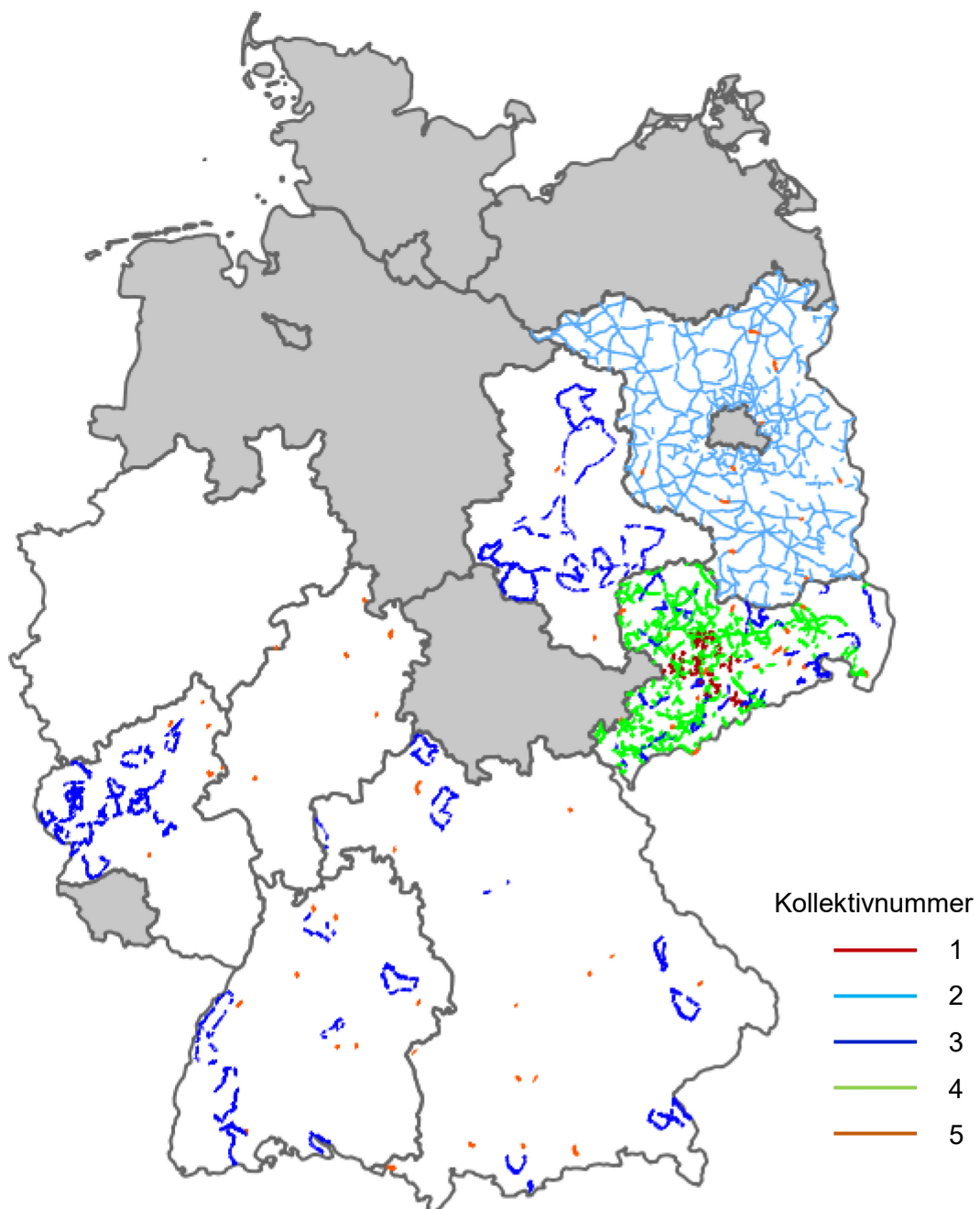


Abb. 4-1: Darstellung der Streckenkollektive

## 4.2 Fahrbahnbreite

Das Gesamtkollektiv umfasst Fahrbahnbreiten zwischen 3,20 m und 10,00 m. Die jeweiligen Fahrbahnbreiten der einzelnen Kollektive sind dabei unterschiedlich verteilt (vgl. Abb. 4-2). Es ist zu erkennen, dass sich die Verteilung der Fahrbahnbreiten von Kollektiv 1 deutlich von denen der restlichen Streckenkollektive unterscheidet. Es wird daher bei diesem Teil der Untersuchung separat ausgewertet. Den höchsten Anteil größerer Fahrbahnbreiten ( $B \geq 7,00$  m) hat das Streckenkollektiv 3 (ca. 46 %).

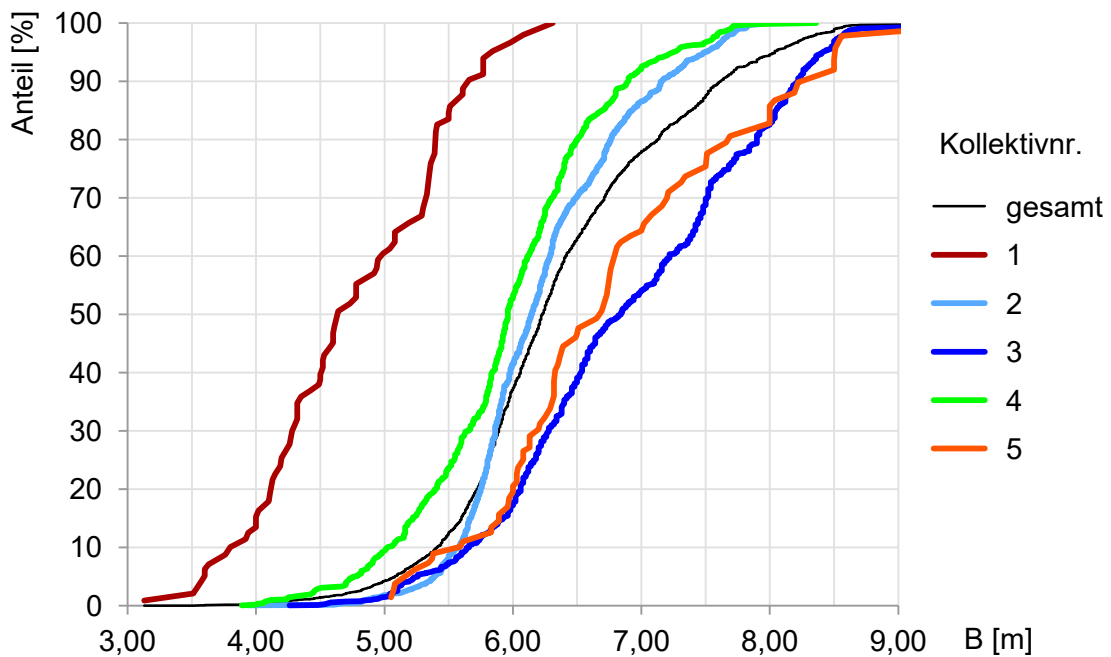


Abb. 4-2: Verteilung der Fahrbahnbreiten differenziert nach den Streckenkollektiven

### Streckenkollektive 2 bis 5

Die Streckenkollektive 2 bis 5 umfassen 2.540 Straßenabschnitte mit Angaben zu den Fahrbahnbreiten. Die Breitenklassen 6,00 m und 6,50 m haben dabei den größten Streckenanteil (zusammen ca. 50 %). Die Klasse der größten Fahrbahnbreite (8,50 m) hat eine vergleichsweise geringe Stichprobe, ist aber mit 85 Straßenabschnitten dennoch repräsentativ.

Auf diesen Streckenabschnitten ereigneten sich insgesamt 6.126 Unfälle. Die Schwere von Unfällen wird über die Kategorie beschrieben (vgl. Anhang C). Die Fahrbahnbreite hat dabei keinen Einfluss auf die Verteilung der Unfallschwere (bei Berücksichtigung der Unfallkategorien 1 bis 4). Tab. 4-2 zeigt, dass der Anteil der jeweiligen Kategorien offenbar unabhängig von der Breitenklasse um den Kategorie-Gesamtwert schwankt. VIETEN U. A. (2010) beobachteten eine ähnliche Verteilung.

Es ist weiterhin zu erkennen, dass mit sinkender Fahrbahnbreite der Anteil der Unfallfälle deutlich zunimmt (vgl. Tab. 4-2). VIETEN U. A. (2010) führen für diesen Zusammenhang zwei Sachverhalte an.

1. Bei größeren Fahrbahnbreiten können Fahrfehler infolge unangepasster Geschwindigkeiten besser korrigiert werden.
2. Die i. A. geringere Verkehrsbelastung bei schmalen Querschnitten führt zu weniger Konfliktsituationen. Dadurch sinkt der Anteil der Längsverkehrsunfälle.

Tab. 4-2: Anteil der Unfälle (Kategorie/Typ) differenziert nach der Fahrbahnbreite

Breitenklasse (Stichprobe n)	Unfallkategorie				Unfalltyp	
	1	2	3	4	1	6
5,00 m (168)	3 %	30 %	36 %	31 %	70 %	30 %
5,50 m (335)	3 %	28 %	41 %	29 %	77 %	23 %
6,00 m (759)	4 %	28 %	41 %	27 %	70 %	30 %
6,50 m (536)	3 %	26 %	41 %	30 %	68 %	32 %
7,00 m (286)	3 %	27 %	42 %	28 %	66 %	34 %
7,50 m (244)	4 %	25 %	45 %	26 %	60 %	40 %
8,00 m (127)	3 %	23 %	41 %	33 %	57 %	43 %
8,50 m (85)	5 %	23 %	48 %	25 %	44 %	56 %
$\Sigma$ (2.540)	4 %	26 %	42 %	28 %	65 %	35 %

Der Einfluss der Fahrbahnbreite auf die Verkehrssicherheit wird anhand relativer Unfallkenngrößen abgeschätzt (vgl. Ziffer 3.5.6). Es ergibt sich ein enger Zusammenhang zwischen der Unfallrate bzw. Unfallkostenrate und der Fahrbahnbreite (vgl. Abb. 4-3). Die mittlere Unfallrate nimmt mit größerer Fahrbahnbreite stetig ab und kann über eine lineare Funktion gut beschrieben werden (Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,95$ ). Sie liegt bei Straßen der Breitenklasse 8,50 m nur bei ca. 40 % des Wertes der Breitenklasse 5,00 m. Diese Abhängigkeit wird auch bei der Berücksichtigung der Unfallschwere deutlich. Die Unfallkostenrate sinkt ab der Breitenklasse 6,00 m kontinuierlich mit zunehmender Fahrbahnbreite.

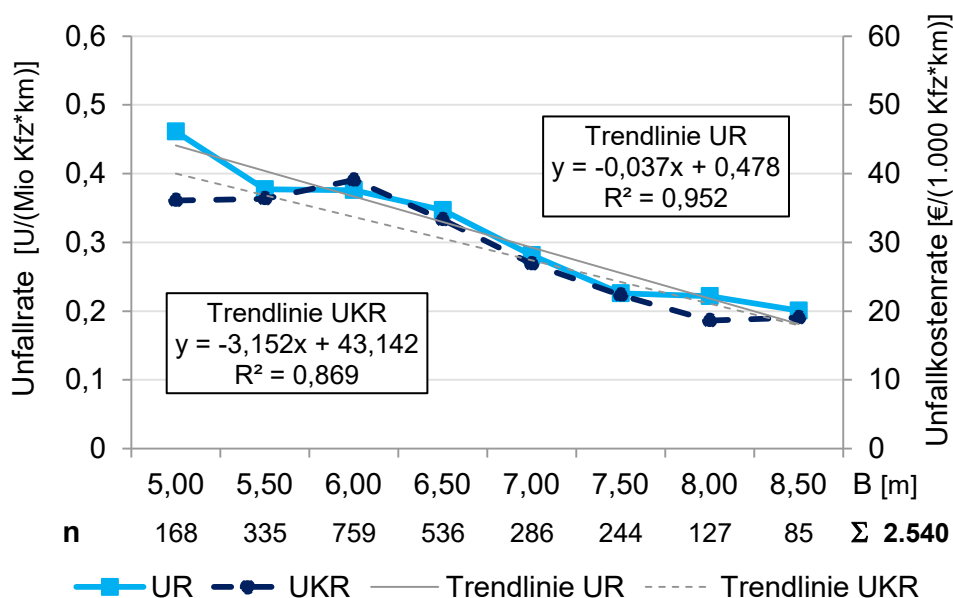


Abb. 4-3: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite (Streckenkollektive 2 bis 5)



Dieser Trend ist insbesondere auf den Rückgang der Fahrurfälle (Unfalltyp 1) zurückzuführen (vgl. Abb. 4-4). Fahrbahnen mit einer Breite von  $B < 6,25$  m weisen konstant hohe Unfallraten bzw. Unfallkostenraten auf. Die größten Sprünge sind zwischen den Breitenklassen 6,00 m/6,50 m und 6,50 m/7,00 m zu verzeichnen ( $\Delta UR \sim 0,05$  U/(Mio Kfz\*km) bzw.  $\Delta UKR \sim 6$  €/(1.000 Kfz\*km)). VIETEN U. A. (2010) kamen in ihren Untersuchungen qualitativ zu ähnlichen Ergebnissen. Auch hier war der größte Sicherheitsgewinn (sowohl bei der Unfallrate als auch bei der Unfallkostenrate) zwischen den o. g. Breitenklassen zu verzeichnen.

Die relativen Unfallkenngrößen von Unfällen im Längsverkehr (Unfalltyp 6) liegen über alle Breitenklassen hinweg in einem ähnlichen Wertebereich. Lediglich sehr schmale Straßen ( $B < 5,25$  m) weisen durchschnittlich ca. um 50 % höhere Unfallkostenraten als Straßen mit breiteren Fahrbahnen auf.

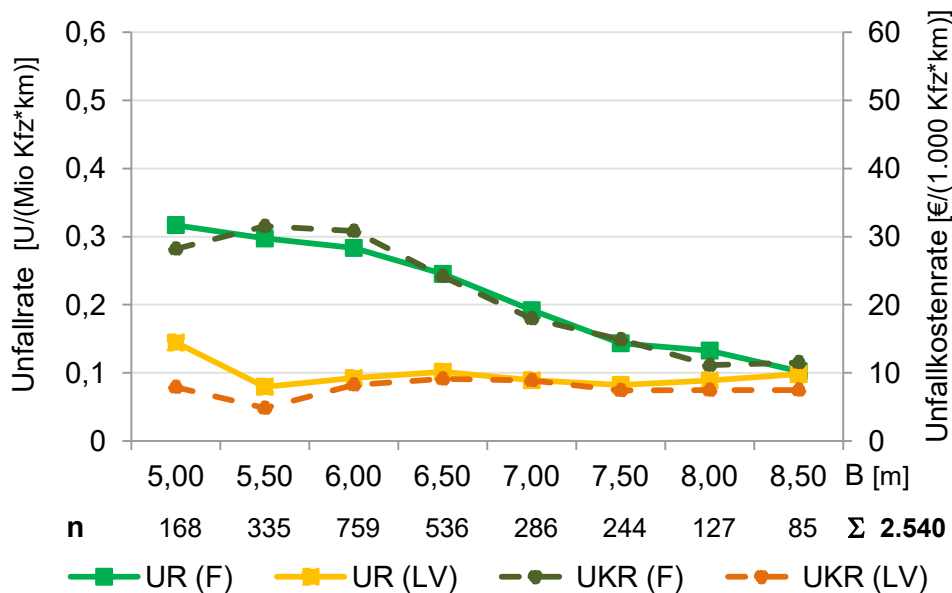


Abb. 4-4: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite (Streckenkollektive 2 bis 5, UR und UKR differenziert nach Unfalltyp 1 - grün und Unfalltyp 6 - orange)

Aufgrund der dargestellten Abhängigkeit zwischen den relativen Unfallkenngrößen der Fahrurfälle und der gewählten Klassifizierung der Fahrbahnbreite kann vermutet werden, dass schmalere Querschnitte i. A. auch eine schlechtere Linienführung haben. Die Summenlinie über die Kurvenradien differenziert nach den Breitenklassen zeigt, dass mit zunehmender Fahrbahnbreite auch der Anteil an größeren Kurvenradien steigt (vgl. Abb. 4-5). Beispielsweise liegt der Anteil an Kurvenradien mit  $R < 200$  m bei Straßenabschnitten der Breitenklasse 5,50 m bei 38 %. Bei Straßen der Breitenklasse 7,50 m ist dieser Anteil nur halb so groß (19 %).

Um den Einfluss der Fahrbahnbreite auf die Verkehrssicherheit zu verdeutlichen, werden die Unfallraten und die Unfallkostenraten für die jeweiligen Breitenklassen differenziert nach relationstrassierten und nicht relationstrassierten Straßenabschnitten berechnet (vgl. Abb. 4-6). Ein Straßenabschnitt gilt im Sinne dieser Arbeit als nicht relationstrassiert, sofern mindestens ein Element des Straßenabschnittes außerhalb des guten Bereiches gemäß der Abb. 2-9 und der Abb. 2-10 liegt. Der Anteil relations-trassierter Straßenabschnitte steigt mit zunehmender Fahrbahnbreite von z. B. 28 %

bei Straßen der Breitenklasse 6,00 m auf ca. 2/3 bei Straßen der Breitenklasse 8,00 m und 8,50 m (vgl. Abb. 4-6). Schmalere Fahrbahnen haben demzufolge durchschnittlich eine schlechtere Linienführung.

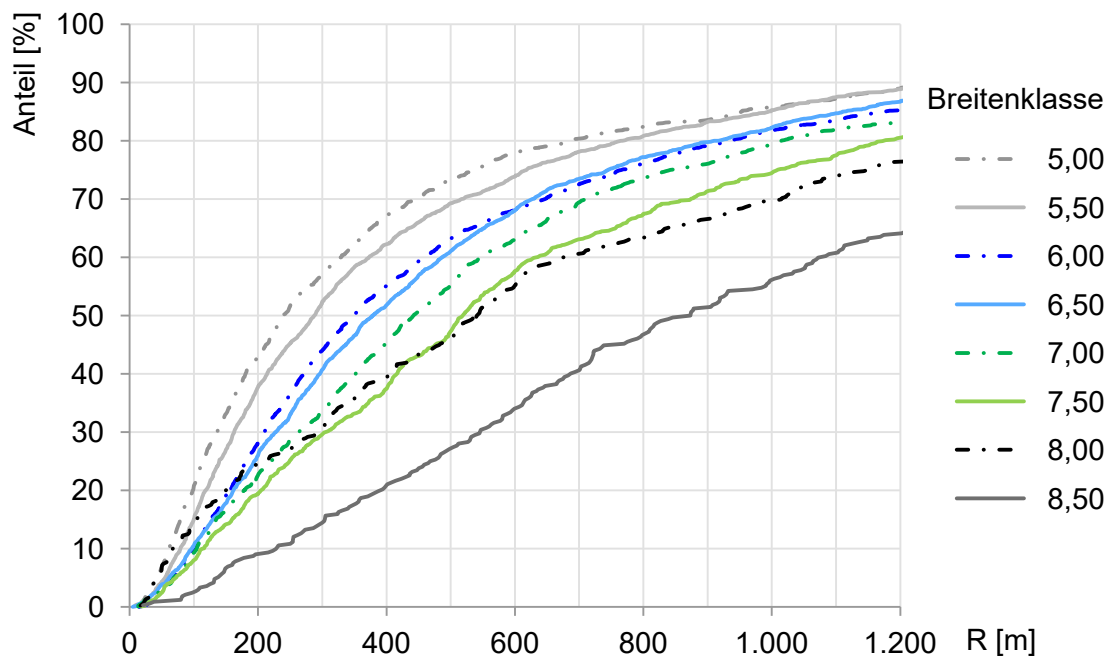


Abb. 4-5: Verteilung der Kurvenradien differenziert nach den Breitenklassen (Streckenkollektive 2 bis 5)

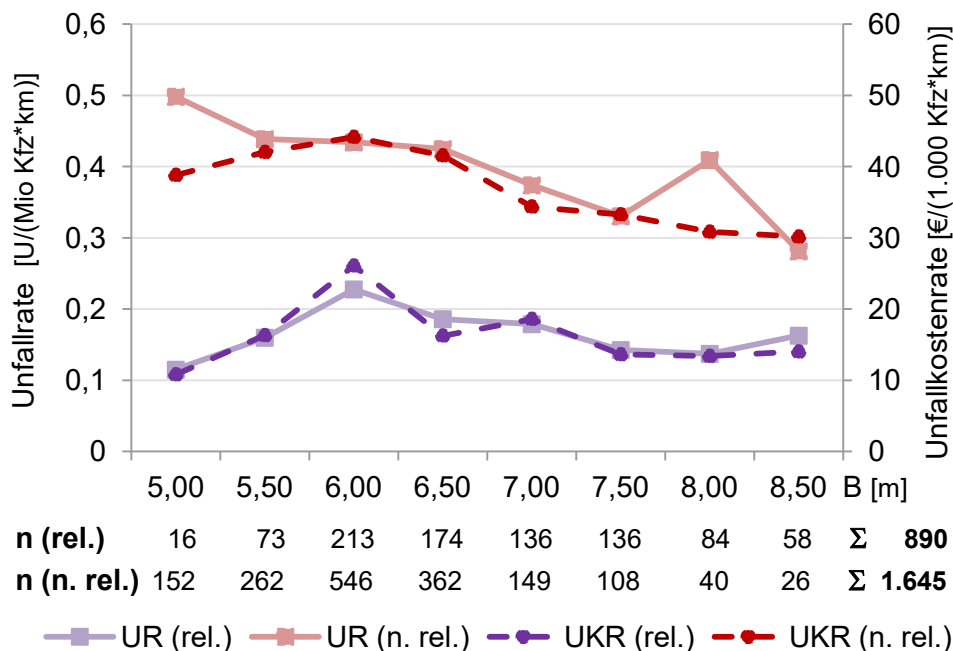


Abb. 4-6: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite (Streckenkollektive 2 bis 5, UR und UKR differenziert nach relationstrassierten (rel. - lila) und nicht relationstrassierten<sup>16</sup> (n. rel. - rot) Strecken)

<sup>16</sup> Der Straßenabschnitt enthält mindestens ein nicht relationstrassiertes Element gemäß der Abb. 2-9 und der Abb. 2-10.

Die relativen Unfallkenngrößen nicht relationstrassierter Straßenabschnitte - differenziert nach Breitenklassen - weisen im Mittel etwa doppelt so hohe Werte auf als relationstrassierte Streckenabschnitte.

Die relativen Unfallkenngrößen von relationstrassierten Straßenabschnitten liegen nahezu unabhängig von der Fahrbahnbreite in einem ähnlichen Wertebereich. Lediglich bei der Breitenklasse 6,00 m ergeben sich leicht erhöhte Werte.

Auf nicht relationstrassierten Straßenabschnitten nehmen die relativen Unfallkenngrößen mit zunehmender Fahrbahnbreite tendenziell ab. Dies bekräftigt die von VIETEN U. A. (2010) formulierte These, wonach Fahrfehler bei größeren Fahrbahnbreiten besser korrigiert werden können. Der größte Sicherheitsgewinn ist zwischen den Breitenklassen 6,50 m und 7,00 m zu verzeichnen. Die Unfallkostenrate sinkt dort um ca. 17 % ( $\Delta\text{UKR} \sim 7 \text{ €}/(1.000 \text{ Kfz} \cdot \text{km})$ ) auf  $\text{UKR} = 34 \text{ €}/(1.000 \text{ Kfz} \cdot \text{km})$ .

Insgesamt ist ein positiver Einfluss größerer Fahrbahnbreiten (Breitenklasse  $\geq 7,00 \text{ m}$ ) auf die Verkehrssicherheit insbesondere bei nicht relationstrassierten Straßenabschnitten zu erkennen. Es zeigt sich jedoch, dass die Aspekte der Linienführung in einem stärkeren Maße auf die Verkehrssicherheit wirken.

### Streckenkollektiv 1

Das Streckenkollektiv 1 (ausgewählte Abschnitte des Kreisstraßennetzes von Mittelsachsen) hat Straßen mit Fahrbahnbreiten zwischen 3,20 m und 6,30 m. Die Stichprobe mit insgesamt 72 Streckenabschnitten ist relativ gering.

Es ist zu beobachten, dass die Unfallkenngrößen der Breitenklassen 4,00 m bis 5,00 m in einem ähnlichen Wertebereich liegen (vgl. Abb. 4-7). Ab Fahrbahnbreiten von  $B \geq 5,50 \text{ m}$  steigen sie sprunghaft an. Die Klasse 6,00 m weist hier überdurchschnittlich hohe Werte auf (Skala beachten).

An dieser Stelle wird noch einmal einschränkend darauf hingewiesen, dass der geringe Stichprobenumfang des Streckenkollektivs 1 keine allgemeinen Aussagen erlaubt. Die Breitenklasse 6,00 m ist nur mit sechs Strecken vertreten. Die hohen relativen Unfallkenngrößen sind hier auf zwei Streckenabschnitte mit insgesamt sechs Unfällen (davon drei mit schwerem Personenschaden) zurückzuführen.

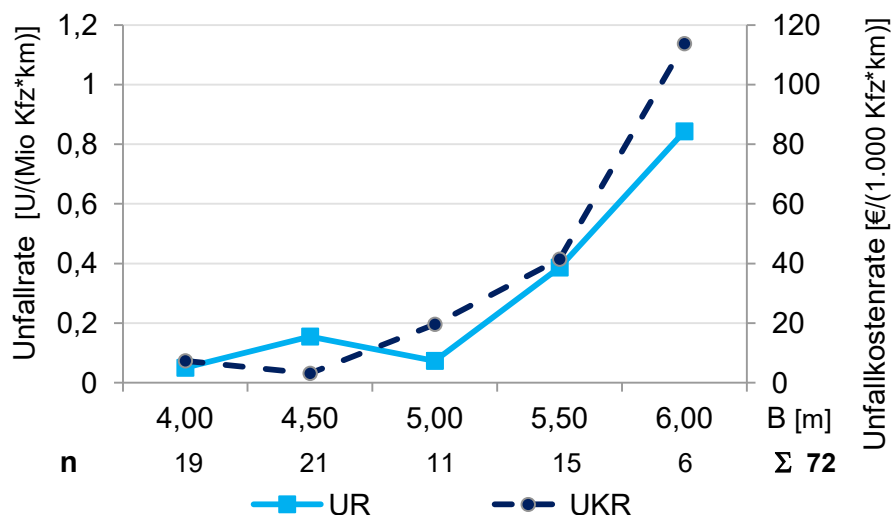


Abb. 4-7: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite (Streckenkollektiv 1)

### 4.3 Kurvenradien und Elementfolgen

Das Streckenkollektiv umfasst 13.852 einzelne Kurvenradien, die eine große Bandbreite aufweisen. Die Verteilungen der Radien der Streckenkollektive 1, 3, 4 und 5 sind ähnlich (vgl. Abb. 4-8). Radien zwischen 50 m und 400 m sind hier am häufigsten vorhanden. Etwa 35 % der Kurven haben Radien von  $R < 200$  m. Das Streckenkollektiv 5 besitzt dort sogar einen Anteil von ca. 50 %.

Die Landstraßen des Grundnetzes von Brandenburg (Streckenkollektiv 2) haben eine gestrecktere Linienführung. Nur etwa 10 % der Kurven weisen hier Radien von  $R < 200$  m auf. Aufgrund der deutlich abweichenden Anteilswerte wird das Streckenkollektiv 2 zusätzlich separat ausgewertet.

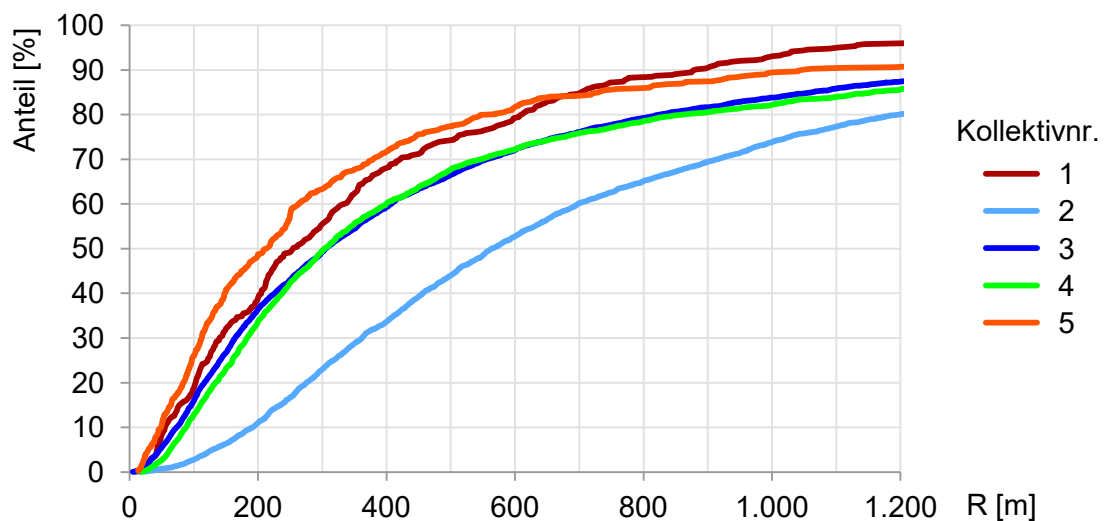


Abb. 4-8: Verteilung der Kurvenradien differenziert nach den Teilkollektiven

Die Verkehrssicherheit von Kurvenradien und Elementfolgen wird mittels relativer Unfallkenngrößen bestimmt (vgl. Ziffer 3.5.7).

#### 4.3.1 Kurvenradius

Der aus der Literatur bekannte prinzipielle Zusammenhang zwischen Kurvenradius und Unfallgeschehen kann hier ebenfalls festgestellt werden. Mit zunehmendem Radius nimmt das Unfallrisiko ab (vgl. Abb. 4-9). Die Relation wird, wie auch in vergleichbaren Untersuchungen, am besten durch eine Logarithmus-Funktion beschrieben (Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,96$ ). Besonders auffällig ist die sehr hohe Unfallrate bei Radien von  $R < 75$  m. Das Risiko zu verunfallen, ist hier um ca. ein Drittel höher als in der folgenden Radienklasse und dreimal größer als bei Radien der Klasse 350 m.

Die Unfallkostenrate vermittelt grundsätzlich ein ähnliches Bild. Sie sinkt mit zunehmendem Kurvenradius und kann ebenfalls über eine Logarithmus-Funktion gut abgebildet werden (Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,92$ ). Bei abstrahierter Betrachtung sind grob vier Niveaus zu erkennen. Kurvenradien der Klasse 50 m und 100 m ( $R < 125$  m) weisen sehr hohe Werte auf (UKR  $\sim 12$  €/1.000 Kfz\*Element), die mehr als 30 % über dem Wert der Radienklasse 150 m liegen. Die „zweite Stufe“ umfasst Radien von  $125 \text{ m} \leq R < 325$  m, deren Wertebereich wiederum durchschnittlich 40 % über dem dritten Niveau ( $325 \text{ m} \leq R < 700$  m) liegt. Radien von  $R > 700$  m können einer „vierten Stufe“ zugeordnet werden. Bei den Untersuchungen von KREBS/GLÖCKNER (1977) stellten sich qualitativ ähnliche Ergebnisse ein.

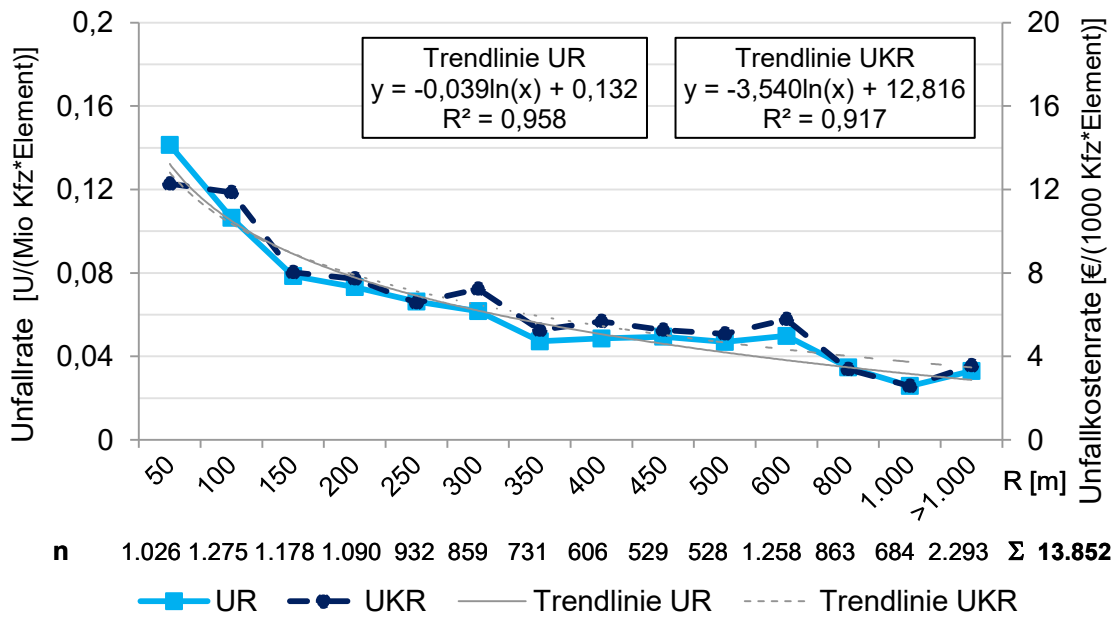


Abb. 4-9: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit vom Kurvenradius

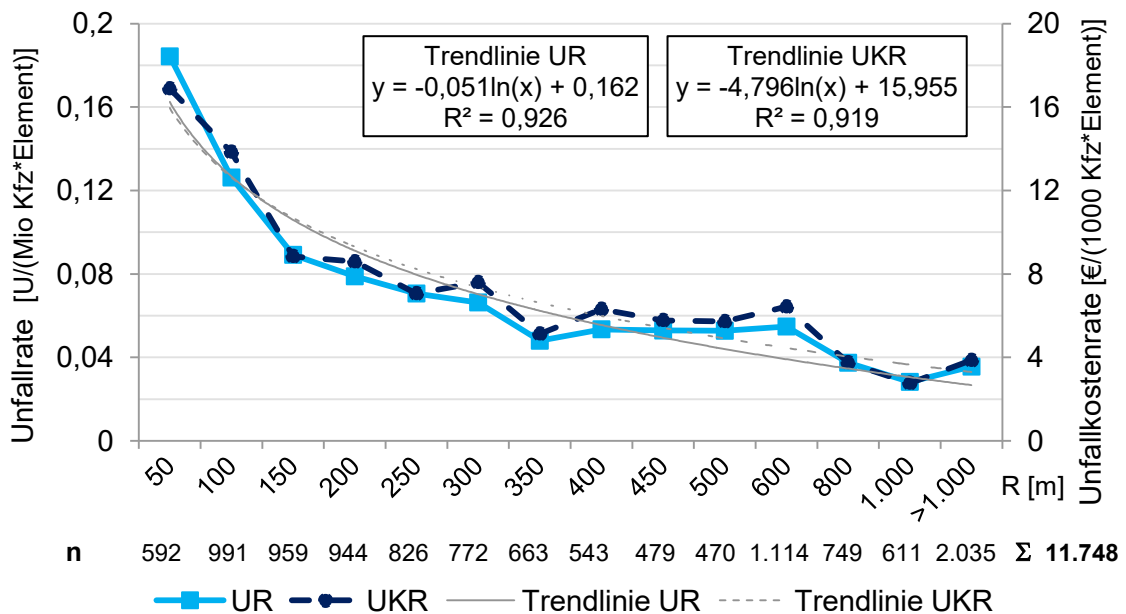


Abb. 4-10: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit vom Kurvenradius ( $L_{\text{Kurve}} \geq 50 \text{ m}$ )

Die Unfallkenngrößen der Streckenkollektive 1, 3, 4, und 5 zeigen grundsätzlich dieselben Tendenzen. Allerdings kann hier bereits ab der Radienklasse 250 eine niedrigere relative Unfallschwere festgestellt werden. Die „zweite Stufe“ der Unfallkostenrate wird demnach vorwiegend durch die Kurvenradien aus dem Grundnetz Brandenburg geprägt (vgl. Anhang F).

Bei Begrenzung des Kollektivs auf Kurven, die eine Mindestlänge von  $L \geq 50 \text{ m}$  aufweisen, stellen sich insbesondere bei kleineren Kurvenradien ( $R < 125 \text{ m}$ ) deutlich höhere Unfallkenngrößen ein. In den weiteren Radienklassen sind nur noch geringe Unterschiede in den Unfallkenngrößen zum gesamten Streckenkollektiv festzustellen.

Bei Kurven mit einer geringer Länge ( $L < 50$  m) ist hingegen dieser allgemeine Trend nicht zu beobachten. Selbst bei sehr kleinen Radien sind eher geringe Unfallkennwerte zu verzeichnen. Bei Kurven mit geringen Längen besteht die Möglichkeit, durch das „Schneiden“ von Kurven größere Radien zu fahren (vgl. Ziffer 2.1.2). Insbesondere bei kleinen Kreisbögen können dadurch erhebliche „Radiengewinne“ erzielt werden. Daraus entstehende Konflikte mit dem Gegenverkehr (Unfälle im Längsverkehr) sind nicht Bestandteil dieser Untersuchungen.

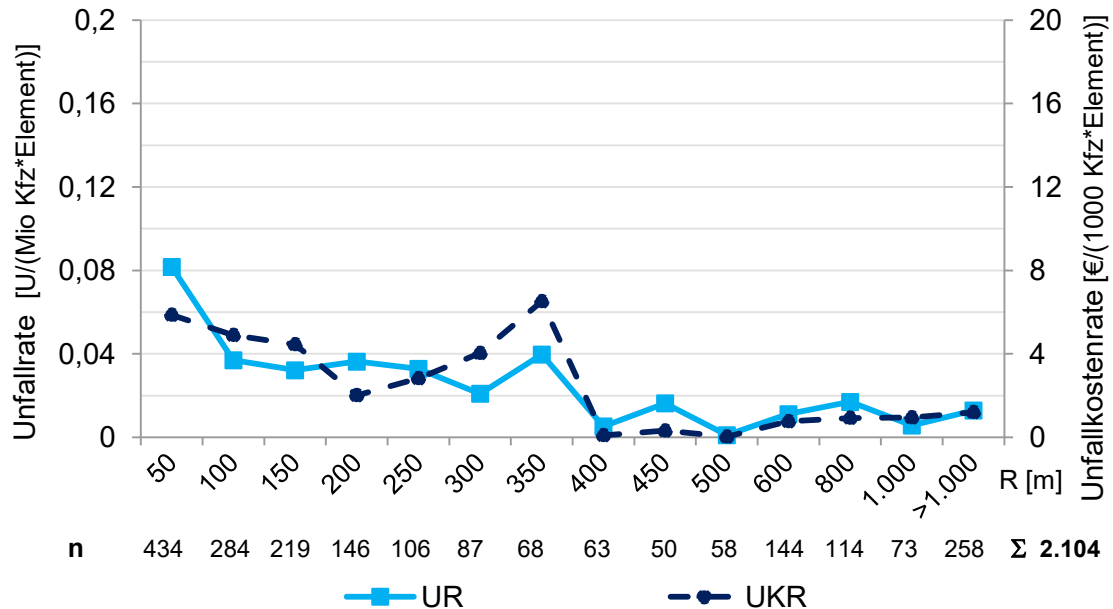


Abb. 4-11: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit vom Kurvenradius ( $L_{\text{Kurve}} < 50$  m)

Die Differenzierung des Kollektivs nach den Fahrbahnbreiten liefert für die Untersuchung der Kurvenradien keine neuen Erkenntnisse. Bei Straßen der Breitenklassen 5,00 m bis 6,50 m stellt sich qualitativ der gleiche Verlauf der Unfallkenngrößen ein. Breitere Fahrbahnen (Klasse 7,00 m bis 8,50 m) weisen hier insbesondere bei den Radienklassen 200 m bis 350 m niedrigere Unfallkennwerte auf. Damit wird die bereits unter Ziffer 4.2 formulierte Vermutung, dass bei größeren Fahrbahnbreiten Fahrfehler besser korrigiert werden können, bekräftigt (vgl. Anhang F).

Es bleibt festzuhalten, dass Kurvenradien von  $R < 125$  m sehr hohe Unfallkennwerte aufweisen. BITZL (1964), KREBS/GLÖCKNER (1977) und LEUTZBACH/ZOELLMER (1989) kamen in ihren Untersuchungen zu derselben Erkenntnis. Diese Radien sollten demnach auf Landstraßen grundsätzlich vermieden werden. Der aus dem Unfallrisiko vermutete Sicherheitsgewinn größerer Kurvenradien, kann bei zusätzlicher Berücksichtigung der Unfallschwere nicht pauschal bestätigt werden. Erst Radien der Klasse 350 m und weiter der Klasse 800 m führen sprunghaft zu einer deutlichen Verbesserung der Verkehrssicherheit. Diese Tatsache verdeutlicht, dass die Stetigkeit der Linienführung (und damit die Sicherheit) nicht ausschließlich über die Größe eines Einzelelementes abgeschätzt werden kann, sondern außerdem über das Verhältnis aufeinanderfolgender Elemente bestimmt wird.

### 4.3.2 Folge gegenseitig gekrümmter Kurven

In den RAL (FGSV 2012a) werden mit der „Radientulpe“ (vgl. Abb. 2-9) Anforderungen zum Verhältnis aufeinanderfolgender Kurvenradien definiert. Die Grenze des guten/brauchbaren Bereichs dient dabei als Maßstab für diese Untersuchungen. Die Radien der Streckenkollektive werden dem Soll-Wert nach Abb. 2-9 gegenübergestellt. Das sich mittels Gl. 2-2 ergebende prozentuale Maß der Abweichung wird in sieben Klassen eingeteilt (vgl. Ziffer 3.5.7).

Radien des guten Bereichs haben sich in der Literatur als sicher herausgestellt. Auch hier stellen sich bei relationstrassierten Kurvenradien (vgl. Abb. 4-12 – Klasse 0 %) geringe Unfallkenngrößen ein. Das trifft ebenfalls noch für Kurven zu, deren Radien bis zu 25 % vom geforderten Verhältnis abweichen. Ab der Klasse 30 % steigen sowohl die Unfallrate als auch die Unfallkostenrate sprunghaft auf etwa den doppelten Wert an. Die weiteren Abweichungsklassen weisen ähnlich hohe Unfallkennwerte auf.

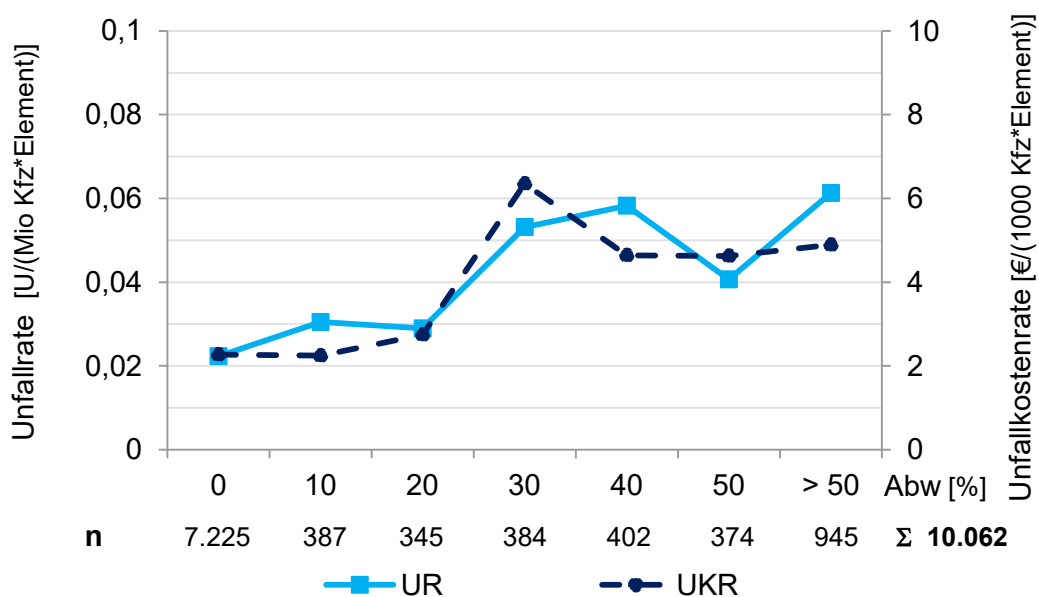


Abb. 4-12: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation gegenseitig gekrümmter Kurvenradien (R-R  $\leftrightarrow$ ) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung

Bei ausschließlicher Betrachtung der Streckenkollektive 1, 3, 4 und 5 ist der Sprung der Unfallrate zwischen den Abweichungsklassen 20 % und 30 % noch deutlicher ausgeprägt (vgl. Anhang G - Abb. G-1). Die Radienfolgen des Grundnetzes in Brandenburg weisen bei der Klasse 30 % vergleichsweise geringe Unfallraten auf (vgl. Abb. 4-13). Sie liegt in einem ähnlichen Wertebereich wie die niedrigeren Abweichungsklassen. Der sprunghafte Anstieg ist hier erst beim Übergang zur folgenden Klasse 40 % zu sehen. Die Unfallkostenrate bestätigt hingegen die zuvor festgestellte „Grenze“. Sie nimmt von der Klasse 20 % zur Klasse 30 % um mehr als das Dreifache zu. Damit sind auch beim Grundnetz trotz anteilig größerer Radien, Kurven, die mehr als 25 % von den Forderungen der Relationstrassierung (Folge R-R) abweichen (also mindestens der Klasse 30 % zuzuordnen sind), als sicherheitskritisch anzusehen.

Dieser Zusammenhang stellt sich bereits bei geringen Kurvenlängen ( $L < 50$  m) ein (vgl. Anhang G - Abb. G-2). Zwar sind die Werte der Unfallkenngrößen insbesondere bei den größeren Abweichungen wesentlich niedriger. Dennoch ist wieder ein deutlicher Anstieg der Unfallkennwerte ab der Abweichungsklasse 30 % zu erkennen.

Längere Kurven ( $L \geq 50$  m) verdeutlichen das zuvor beschriebene Bild mit größeren Absolutwerten (vgl. Abb. 4-14).

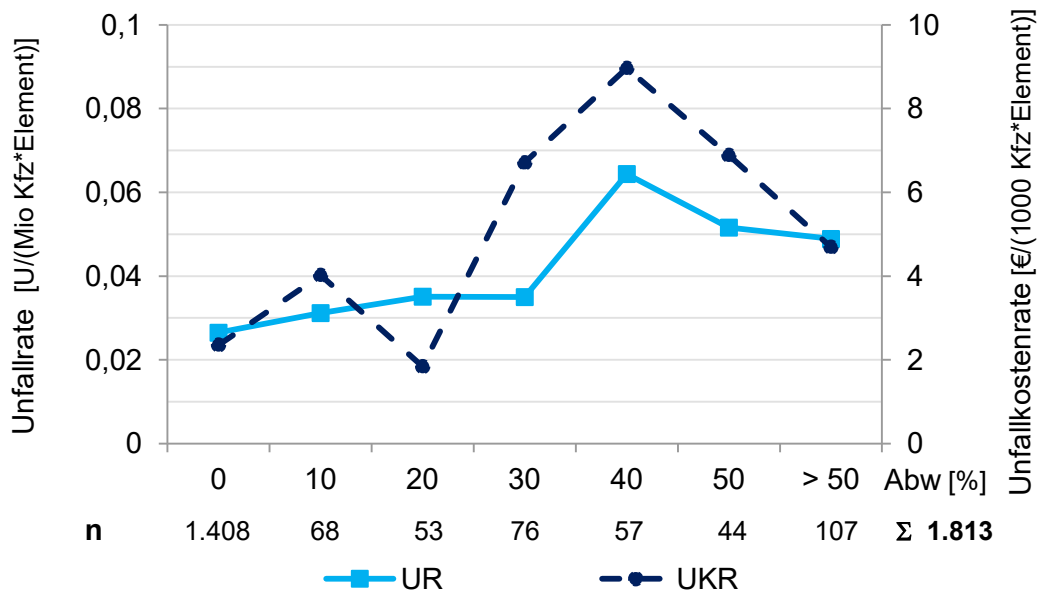


Abb. 4-13: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation gegensinnig gekrümmter Kurvenradien ( $R-R \curvearrowright$ ) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung (Streckenkollektiv 2)

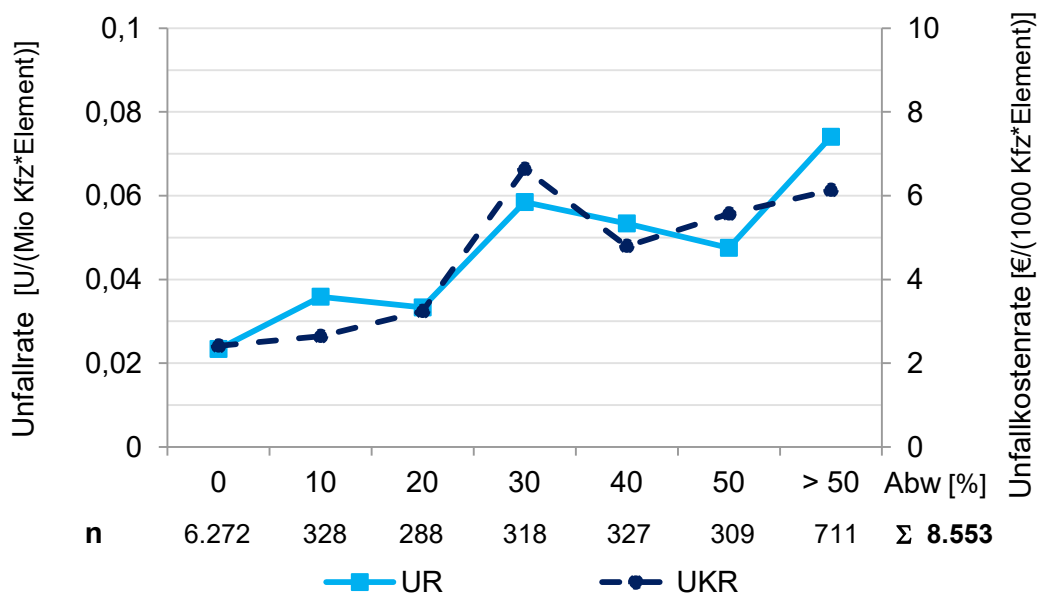


Abb. 4-14: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation gegensinnig gekrümmter Kurvenradien ( $R-R \curvearrowright$ ) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung ( $L_{\text{Kurve}} \geq 50$  m)

Der Großteil der hier untersuchten Elementfolgen hat Fahrbahnbreiten der Klasse 5,00 m bis 6,50 m. Sie prägen demnach den oben dargestellten Verlauf. Elementfolgen mit größeren Fahrbahnbreiten sind im Kollektiv relativ wenig vorhanden (Stichprobenumfang der Abweichungsklassen 10 % bis 50 %: jeweils  $n < 100$ ). Die eindeutige Abgrenzung ist hier nicht mehr erkennbar. Es sind höhere Unfallkennwerte bei bereits geringen Abweichungen zu beobachten. Es wird vermutet, dass das bei breiteren



Fahrbahnen höhere Geschwindigkeitsniveau eine schärfere Einhaltung der Relationsstrassierung erfordert. Nach den Richtlinien aufeinander abgestimmte Kurvenradien (Klasse 0 %) haben sich auch bei größeren Fahrbahnbreiten als unkritisch herausgestellt (vgl. Anhang G - Abb. G-4). Dies bekräftigt die Forderung der RAL (FGSV 2012a), bei höheren Entwurfsklassen großzügigere Entwurfselemente vorzusehen. Allerdings ist bei der Interpretation der Unfallkennwerte der geringe Stichprobenumfang zu berücksichtigen.

### 4.3.3 Folge gleichsinnig gekrümmter Kurven

Im Untersuchungskollektiv sind weiterhin 6.497 auswertbare Kurvenfolgen mit gleichem Richtungssinn enthalten. Dabei sind Eiliniien und gleichsinnig gerichtete Kurven mit Zwischengeraden von bis zu 300 m Länge berücksichtigt (vgl. Ziffer 3.5.7). Die Analyse des Unfallgeschehens zeigt insgesamt ein ähnliches Bild wie die der Elementrelationen gegensinnig gekrümmter Kurven. Bei größeren Abweichungen von den Forderungen der Relationstrassierung steigen die Unfallkenngrößen sprunghaft an. Allerdings nimmt die Unfallkostenrate bereits ab der Abweichungsklasse 20 % merklich zu (vgl. Abb. 4-15). Die Unfallrate hat ihren größten Anstieg erst bei der Abweichungsklasse 40 %. Kurven größerer Länge ( $L \geq 50$  m) weisen - mit ausgeprägter Spitze bei der Abweichungsklasse 40 % - qualitativ denselben Verlauf auf (vgl. Anhang G - Abb. G-5).

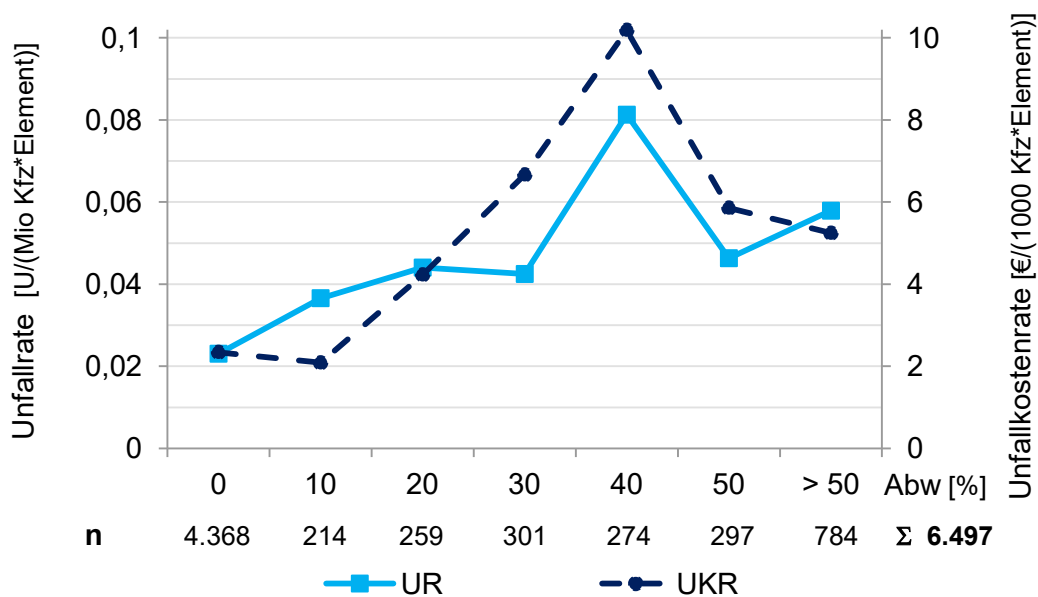


Abb. 4-15: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation gleichsinnig gekrümmter Kurvenradien (R-R  $\Rightarrow$ ) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung

Kurvenfolgen mit gleichem Richtungssinn und Fahrbahnbreiten von  $B < 6,75$  m (Klasse der Fahrbahnbreite 5,00 m bis 6,50 m) zeigen einen ähnlichen Verlauf der Unfallkenngrößen (vgl. Abb. 4-16). Der sprunghafte Anstieg der Unfallkostenrate ist dort jedoch erst bei der Abweichungsklasse 30 % zu verzeichnen. Bei größeren Fahrbahnbreiten stellt sich ein anderer Verlauf ein. Der sprunghafte Anstieg der Unfallrate und der Unfallkostenrate liegt bereits bei der Abweichungsklasse 20 % (vgl. Abb. 4-17). Somit wird die bereits oben formulierte Hypothese bekräftigt, dass bei Straßen mit breiteren Fahrbahnen die Elementfolgen besser aufeinander abzustimmen sind.

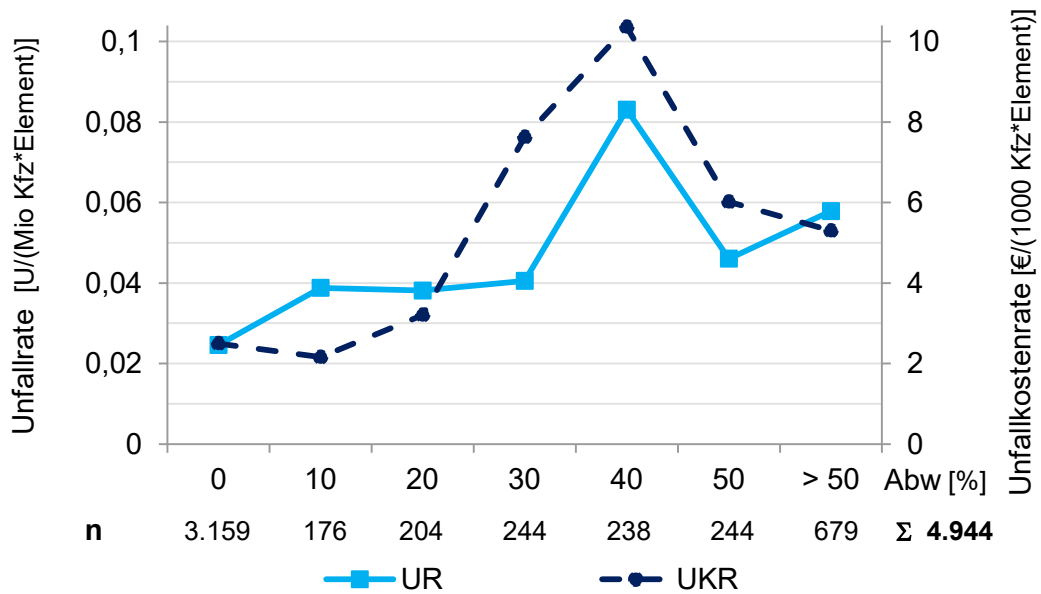


Abb. 4-16: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation gleichsinnig gekrümmter Kurvenradien (R-R  $\Rightarrow$ ) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung (Klasse der Fahrbahnbreite 5,00 m bis 6,50 m)

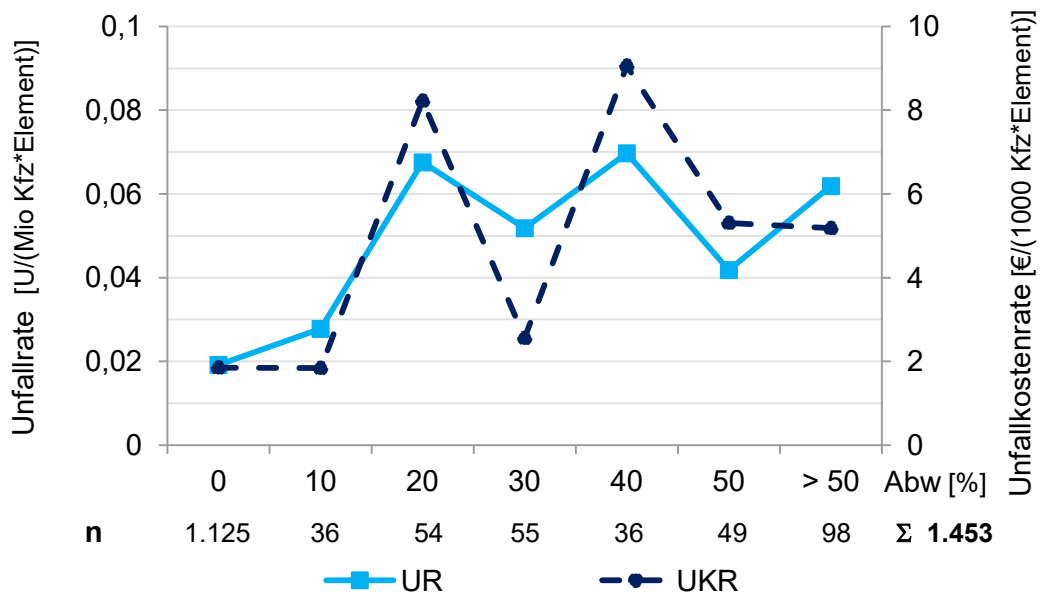


Abb. 4-17: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation gleichsinnig gekrümmter Kurvenradien (R-R  $\Rightarrow$ ) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung (Klasse der Fahrbahnbreite 5,00 m bis 6,50 m)

Insgesamt ist festzuhalten, dass die Relation gleichsinnig gekrümmter Kurven ebenfalls ab der Abweichungsklasse 30 als unsicher einzustufen ist. Dort ist gemäß Abb. 4-16 für Fahrbahnen der Breitenklasse 5,00 m bis 6,50 m der größte absolute „Sprung“ bei der Unfallkostenrate festzustellen. Die Unfallkostenrate des gesamten Streckenkollektivs (vgl. Abb. 4-15) entspricht etwa dem Niveau gegensinnig gekrümmter Kurven.

#### 4.3.4 Kurvenradien im Anschluss an Geraden

Im Anschluss an Geraden sind Mindestradien zu gewährleisten. Die RAL (FGSV 2012a) definieren dazu wieder drei Bereiche (gut/brauchbar/zu vermeiden - vgl. Abb. 2-10). In Anlehnung an die bereits zuvor beschriebene Systematik werden die Grenze des guten/brauchbaren Bereichs als Maßstab herangezogen, die Radien des Streckenkollektivs den erforderlichen Werten nach Abb. 2-10 gegenübergestellt sowie das prozentuale Maß der Abweichung nach Gl. 2-2 berechnet und klassifiziert (vgl. Ziffer 3.5.7).

Kurvenradien, die der geforderten Relation G-R entsprechen, weisen bei dieser Elementfolge ebenfalls geringe Unfallkenngrößen auf. Die Unfallrate und Unfallkostenrate der Klasse 0 % entsprechen nahezu den Werten relationstrassierter Radienfolgen (vgl. Abb. 4-18 mit Abb. 4-12/Abb. 4-15). Mit zunehmenden Abweichungen steigen die Unfallkenngrößen stetig an. Eine klare Abgrenzung sicherheitskritischer Abweichungen stellt sich hier nicht ein. Bei der Folge gegensinnig gekrümmter Kurven ist bei der Klasse 30 % ein Sprung der Unfallkenngrößen auf  $UR = 0,53 \text{ U}/(\text{Mio Kfz} \cdot \text{Element})$  und  $UKR = 6,4 \text{ €}/(1000 \text{ Kfz} \cdot \text{Element})$  festzustellen. Vergleichbar hohe Unfallkennwerte sind hier erst ab der Abweichungsklasse 40 % zu verzeichnen. Die Unfallkostenrate der Klasse 30 % liegt ca. 25 % unterhalb des Wertes der Klasse 40 %. Dieser Verlauf stellt sich auch bei Kurven mit einer Länge von  $L \geq 50 \text{ m}$  ein (vgl. Anhang H - Abb. H-2).

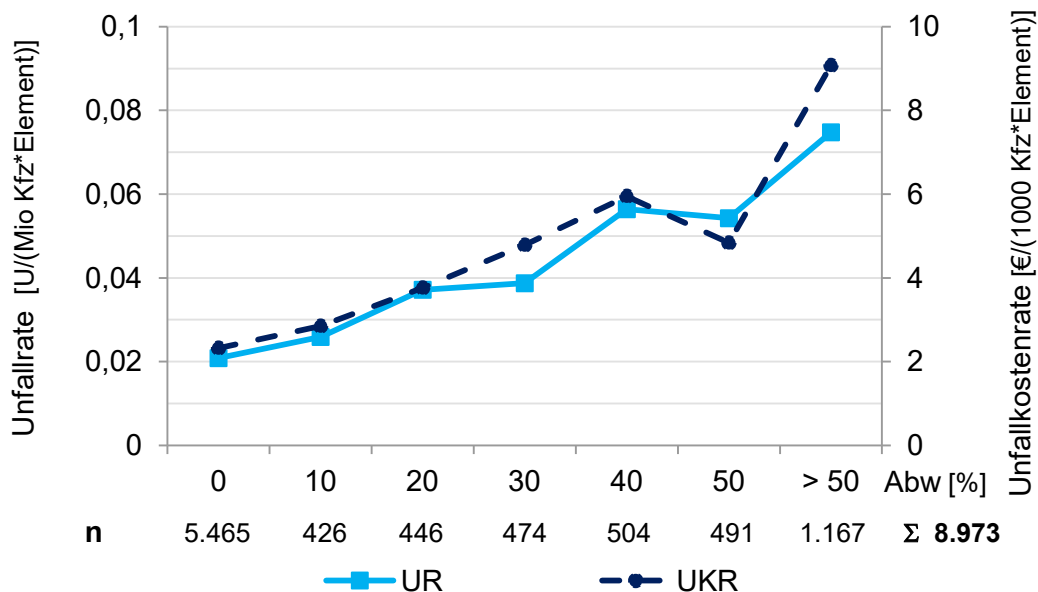


Abb. 4-18: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate von Radien im Anschluss an Geraden (Relation G-R) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung

Der sprunghafte Verlauf der Unfallkenngrößen über die jeweiligen Abweichungsklassen der Relation R-R stellt sich in ähnlicher Form/Ausprägung auch bei der Relation G-R ein, wenn nur die Streckenkollektive 1, 3, 4 und 5 berücksichtigt werden (vgl. Abb. 4-19). Nach nur geringen Unterschieden zwischen den Klassen 0 % bis 20 % ist bei der Klasse 30 % wieder eine deutliche Zunahme der Unfallkennwerte zu sehen. Die Unfallkenngrößen der Elementfolgen G-R des Streckenkollektivs 2 (Grundnetz Brandenburg) zeigen hingegen bereits bei der Klasse 20 % erhöhte Werte (vgl. Anhang H - Abb. H-1).

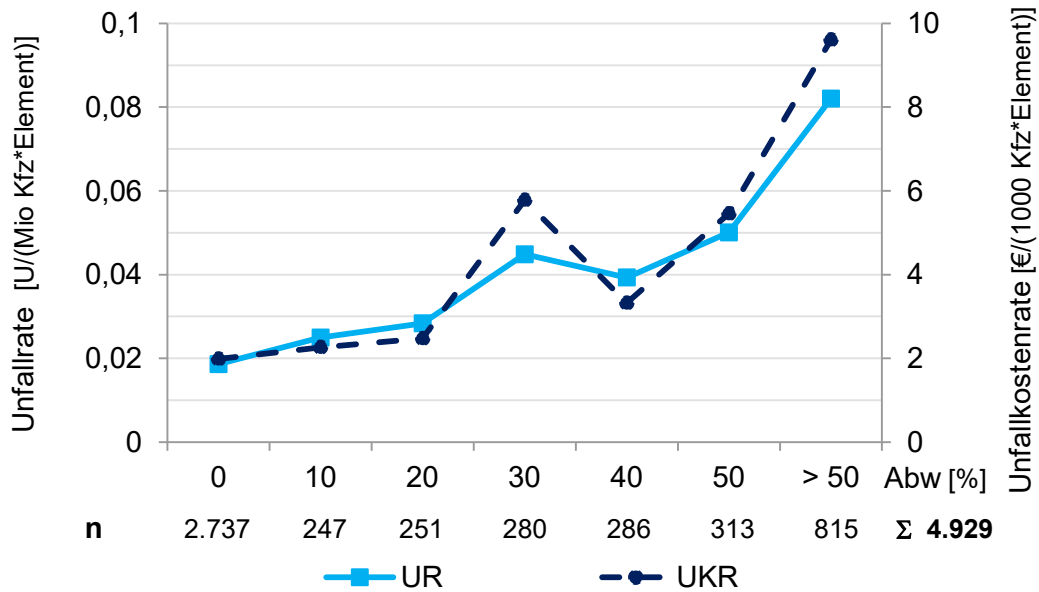


Abb. 4-19: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate von Radien im Anschluss an Geraden (Relation G-R) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung (Streckenkollektive 1, 3, 4 und 5)

Bei Kurven geringer Länge ( $L < 50$  m) zeigt sich der größte Sicherheitsgewinn zwischen der Abweichungsklasse 20 % und 30 %. Die Unfallkostenrate steigt dort um über den doppelten Wert an. Es ist bei der Interpretation der Ergebnisse einschränkend der geringe Stichprobenumfang in den Abweichungsklassen 10 % bis 50 % (jeweils  $n < 100$ ) zu beachten.

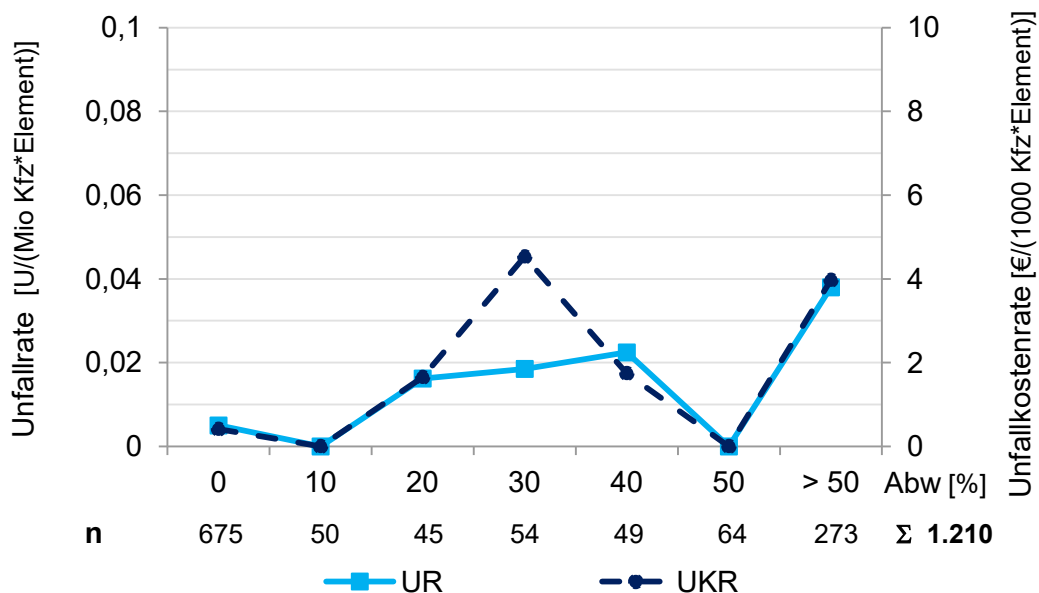


Abb. 4-20: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate von Radien im Anschluss an Geraden (Relation G-R) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung ( $L_{\text{Kurve}} < 50$  m)

Maßgebenden Einfluss auf die Ergebnisse der Elementrelationen G-R haben die schmaleren Querschnitte (Breitenklasse 5,00 m bis 6,50 m), die zu 80 % im Streckenkollektiv vertreten sind. Der Verlauf der relativen Unfallkenngrößen ähnelt dem des gesamten Streckenkollektivs (vgl. Anhang H - Abb. H-3).

Bei Fahrbahnen der Breitenklasse 7,00 m bis 8,50 m stellt sich ein anderes Bild der Unfallkennwerte für die Elementrelationen G-R ein. Die Unfallrate und die Unfallkostenrate liegen bis zur Abweichungsklasse 30 % auf einem vergleichbar niedrigen Niveau und steigen erst mit der Abweichungsklasse 40 % sprunghaft an (vgl. Abb. 4-21).

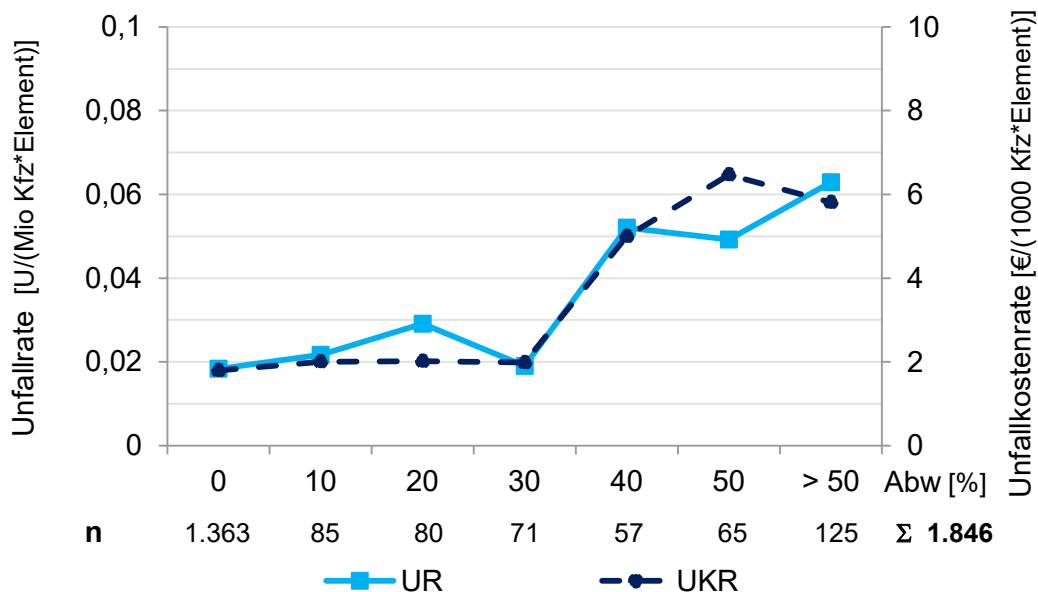


Abb. 4-21: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate von Radien im Anschluss an Geraden (Relation G-R) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung (Klasse der Fahrbahnbreite 7,00 m bis 8,50 m)

Entgegen den Feststellungen der Relation aufeinanderfolgender Radien, wonach bei breiteren Fahrbahnen bereits geringe Abweichungen von der Relationstrassierung zur Verschlechterung der Verkehrssicherheit führen, scheinen die Mindestradien im Anschluss an Geraden bei breiteren Fahrbahnen größere Abweichungen zu ermöglichen. Dies bestätigt die unter Ziffer 4.2 formulierte Hypothese, dass bei breiteren Querschnitten bis zu einem gewissen Maße Defizite im Lageplan kompensiert werden können. Es ist jedoch bei diesen Einschätzungen einschränkend der vergleichsweise geringe Stichprobenumfang für Elementrelationen mit größeren Fahrbahnbreiten zu beachten.

#### 4.4 Kurvigkeit des Einzelbogens und Kurvigkeitdifferenzen

Das Streckenkollektiv umfasst 13.838 Einzelkurven. Daraus ergeben sich 27.569 Kurven mit bewertbarem Annäherungsbereich (richtungsgetrennte Auswertung der Kurvigkeitdifferenzen). Die Anteile der Einzelkurvigkeiten bzw. der Kurvigkeitdifferenzen getrennt nach den Streckenkollektiven entsprechen sinngemäß den Verteilungen der Kurvenradien (vgl. Anhang I - Abb. I-1 und Abb. I-2). Die Streckenkollektive 1, 3, 4 und 5 haben ähnliche Anteilswerte. Die gestrecktere Linienführung des Streckenkollektivs 2 (Grundnetz Brandenburg) ist hier ebenfalls erkennbar. Das Grundnetz weist anteilig kleinere Kurvigkeiten des Einzelbogens bzw. Kurvigkeitdifferenzen auf.

#### 4.4.1 Kurvigkeit des Einzelbogens

Die Kurvigkeit des Einzelbogens ist ein Maß für eine einzelne Kurve. Sie beschreibt die Richtungsänderung der Kurve bezogen auf ihre Länge (vgl. Ziffer 2.1.2).

Es stellt sich, ähnlich wie beim Kurvenradius, ein enger Zusammenhang zwischen der Unfallrate und der Klasse der Kurvigkeit des Einzelbogens ein (vgl. Abb. 4-22 – Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,97$ ). Mit steigender Kurvigkeit des Einzelbogens nimmt die Unfallrate überproportional zu. Die Unfallkostenrate zeigt einen ähnlichen Verlauf. Bei Kurven mit einer Länge von  $L \geq 50$  m sind diese Zusammenhänge noch deutlicher ausgeprägt (vgl. Anhang I - Abb. I-4). Sie entsprechen qualitativ den Ergebnissen von LAMM U. A. (1999).

Diese Abhängigkeit trifft allerdings nur bei der gewählten Klassifizierung zu (bzw. bis zu Kurvigkeiten des Einzelbogens von  $KU_E < 650$  gon/km). Bei weiterer Differenzierung der größten Klasse ist keine Zunahme der Unfallkenngrößen mehr festzustellen (vgl. Anhang I - Abb. I-3).

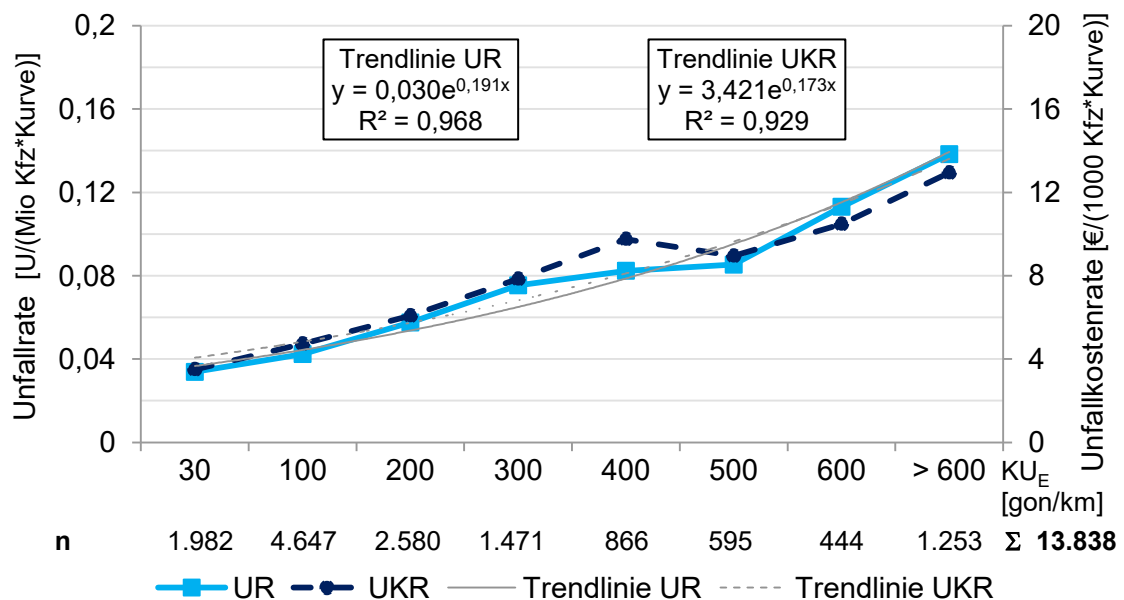


Abb. 4-22: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Kurvigkeit des Einzelbogens

Insgesamt stellt sich eine enge Abhängigkeit zwischen der Kurvigkeit des Einzelbogens und den relativen Unfallkenngrößen ein. Eine klare Abgrenzung sicherheitskritischer Einzelkurven ist allerdings anhand dieses Parameters nicht möglich. Lediglich die letzte Klasse ( $> 650$  gon/km) besitzt leicht höhere Differenzen der Unfallkennwerte zur vorhergehenden Klasse.

#### 4.4.2 Kurvigkeitsdifferenzen

Die Kurvigkeitsdifferenz berechnet sich aus der Differenz von der Kurvigkeit des Einzelbogens zu der mittleren gewichteten Kurvigkeit des Annäherungsbereichs. Sie erlaubt es, die Güte von Elementfolgen einzuschätzen (vgl. Ziffer 2.1.6).

Es zeigt sich, dass geringe Kurvigkeitsdifferenzen vorteilhaft für die Verkehrssicherheit sind (vgl. Abb. 4-23). Mit steigender Kurvigkeitsdifferenz nehmen auch die Unfallkennwerte zu. Der Zusammenhang zwischen der Unfallrate und der Klasse der

Kurvigkeitsdifferenz lässt sich nahezu vollständig über eine lineare Funktion beschreiben (Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,98$ ). Lediglich zwischen der Klasse 300 und 400 ist ein größerer Anstieg zu erkennen. Bei längeren Kurven ( $L \geq 50$  m) ist der Anstieg dort schon etwas größer (vgl. Abb. 4-24). Die Unfallkostenrate grenzt diesen Übergang aber noch deutlicher ab. Sie steigt an dieser Stelle sprunghaft um den doppelten Wert an und erreicht hier ihr lokales Maximum. Die Unfallkostenraten der folgenden höheren Klassen liegen in einem ähnlichen Wertebereich. Die differenzierte Betrachtung nach Streckenkollektiven und Fahrbahnbreiten vermitteln grundsätzlich das gleiche Bild. Lediglich bei Kurven mit größeren Fahrbahnbreiten ( $B > 6,75$  m) sind bereits ab der Klasse 300 erhöhte Unfallkennwerte zu erkennen (vgl. Anhang I - Abb. I-9).

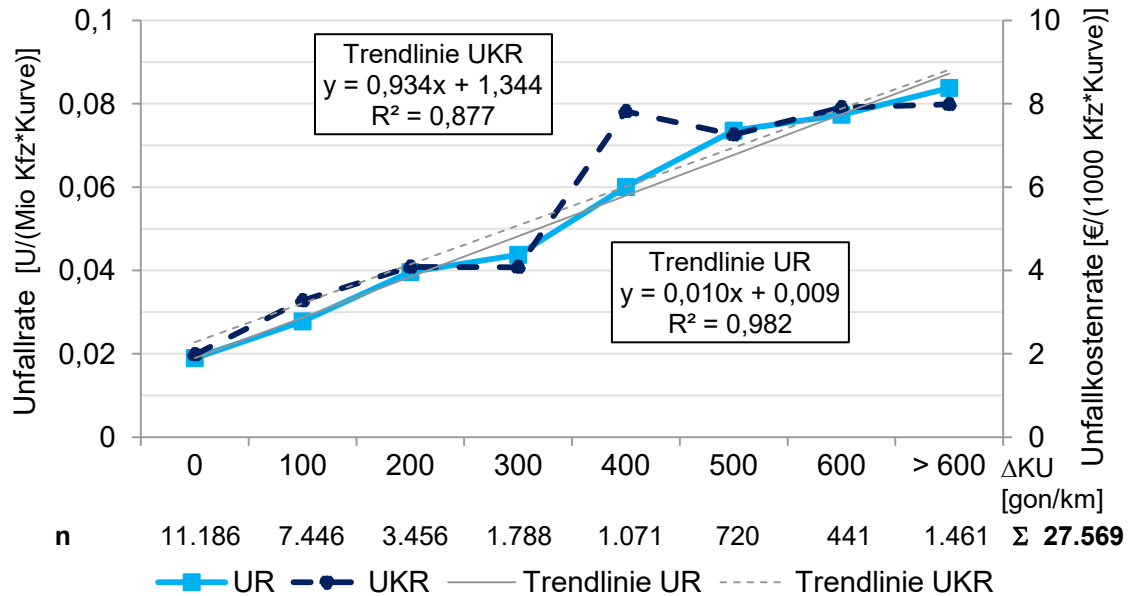


Abb. 4-23: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Kurvigkeitsdifferenz

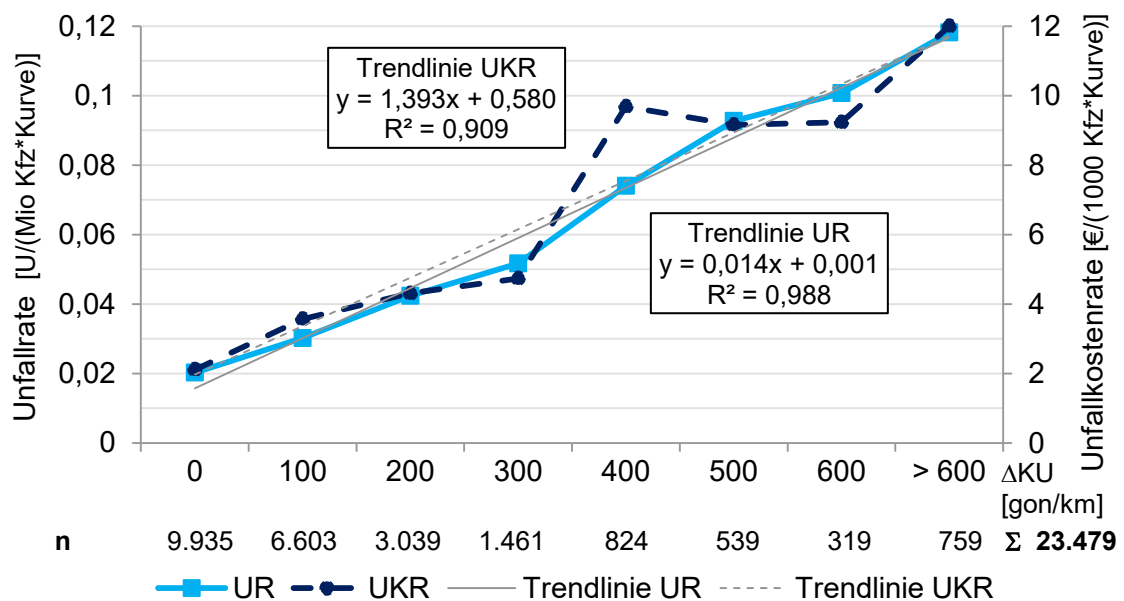


Abb. 4-24: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Kurvigkeitsdifferenz ( $L_{\text{Kurve}} \geq 50$  m)

Letztlich kann festgehalten werden, dass sich die Kurvigkeitsdifferenz ebenfalls eignet, Unstetigkeiten in der Linienführung abzugrenzen. Dabei hat sich eine Kurvigkeitsdifferenz von  $\Delta KU = 400 \text{ gon/km}$  als sicherheitskritisch herausgestellt. STEYER (2004) ermittelte in seinen Untersuchungen denselben Grenzwert.

#### 4.5 Kritische Sichtschattenbereiche

Die in Ziffer 3.4.5 beschriebene Methode zur Detektierung von kritischen Sichtschattenbereichen wurde programmtechnisch umgesetzt und auf die vorliegenden Streckenkollektive angewandt. Insgesamt wurden 1.638 kritische Sichtschattenbereiche detektiert. Diese verteilen sich auf 852 Straßenabschnitte (Gesamtkollektiv: 2.684 Straßenabschnitte). Damit wurde nahezu auf jeder dritten Untersuchungsstrecke mindestens ein kritischer Sichtschattenbereich festgestellt. Dabei waren vor allem die Bundesländer Sachsen, Rheinland-Pfalz, Bayern und Brandenburg (absteigend nach der relativen Häufigkeit [Anzahl pro 100 km]) „betroffen“. Es ist dabei anzumerken, dass der dargestellte Algorithmus die kritischen Sichtschattenbereiche nur anhand des Höhenverlaufs der Strecke berechnet. Hindernisse im Seitenraum, die ggf. die Sicht auf die Fahrbahn innerhalb von 600 m verdecken, bleiben unberücksichtigt. Somit ermittelt der Algorithmus wahrscheinlich mehr kritische Sichtschattenbereiche, als tatsächlich in der Realität vorhanden sind.

Ein pauschaler Zusammenhang zwischen der Verkehrssicherheit und der Häufigkeit von kritischen Sichtschattenbereichen ist allerdings nicht festzustellen (vgl. Abb. 4-25). Unabhängig von der Anzahl (bzw. der Dichte) an kritischen Sichtschattenbereichen sind ähnliche Unfallkennwerte zu verzeichnen. ZIMMERMANN U. A. (2007) stellten für ihre elf Untersuchungsstrecken die Unfälle den Sichtschattenbereichen gegenüber und berechneten u. a. die Unfallraten und die Unfallkostenraten. Dabei stellten sich ebenfalls unterschiedlich hohe Unfallkennwerte ein. Neben den Einflüssen der räumlichen Linienführung auf die Verkehrssicherheit führten sie die vielfach nicht richtlinienkonforme Streckenführung als Unfallursache an.

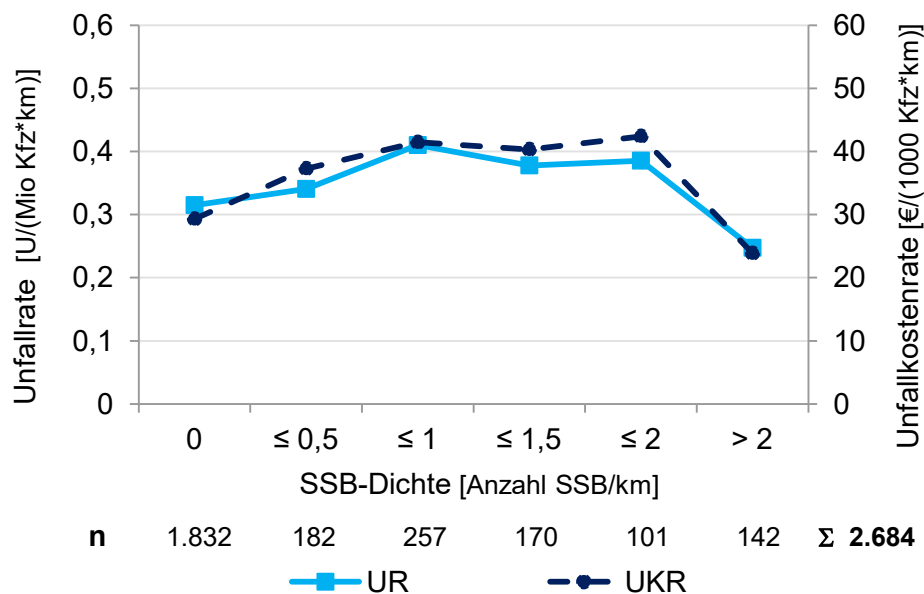


Abb. 4-25: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate von Streckenabschnitten in Abhängigkeit von der Dichte an kritischen Sichtschattenbereichen



In den in Ziffer 3.5.9 definierten Bereichen (Länge der Sichtschattenstrecke + Pufferbereich) ereigneten sich lediglich 520 Unfälle, die sich auf 283 Sichtschattenbereiche verteilen. Damit sind nur bei ca. 17 % der Sichtschattenbereiche Unfälle zu verzeichnen. Grundsätzliche Abhängigkeiten zwischen der Länge der Sichtschattenstrecke und dem Unfallgeschehen sind dabei nicht erkennbar (vgl. Abb. 4-26).

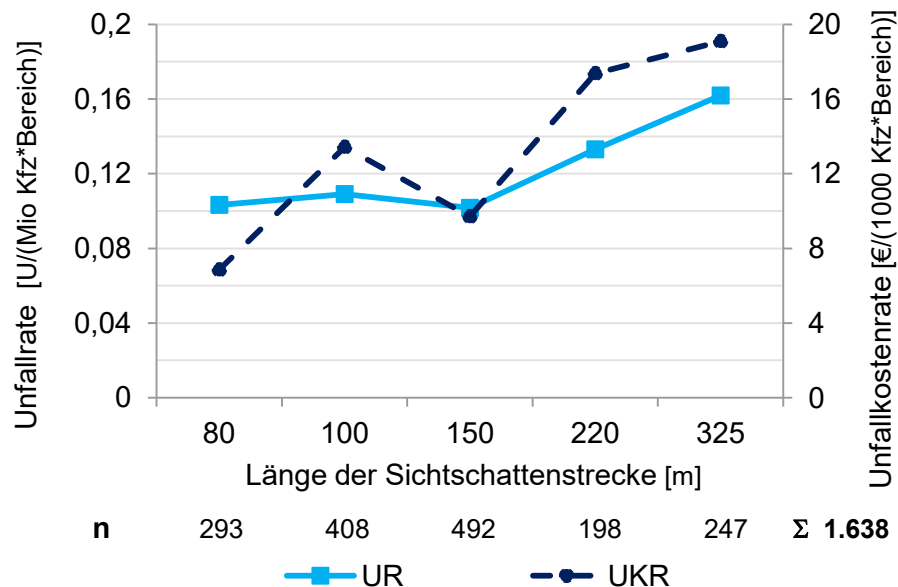


Abb. 4-26: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate von Streckenabschnitten in Abhängigkeit von der Länge der Sichtschattenstrecke

Dennoch sind einige kritische Sichtschattenbereiche unfallauffällig. 20 Sichtschattenstrecken erfüllen das Kriterium einer Unfallhäufungsstelle nach dem M Uko (FGSV 2012c).

ADAMI (2017) untersuchte daher in seiner Arbeit, unter welchen geometrischen und verkehrstechnischen Randbedingungen sich kritische Sichtschattenbereiche als besonders unfallauffällig herausstellen. Auf Grundlage einer Streckenvorauswahl mittels der in Ziffer 3.4.5 dargestellten Methode wählte er unter Berücksichtigung des Seitenraums und der Knotenpunkte/Ortschaften (Mindestabstand: 300 m) letztlich 59 kritische Sichtschattenbereiche aus und analysierte u. a. die Geometrie der Sichtschattenbereiche (Länge und maximale/durchschnittliche Tiefe der Sichtschatten), die Fahrbahnbreite, die vorhandene Seitenraumbepflanzung, die Fahrbahnmarkierung und die zulässige Höchstgeschwindigkeit. Die Auswertungen differenzierte er nach den Ausprägungen „Springen“ (n = 45) und „Tauchen“ (n = 14). Insgesamt wiesen Tauchstrecken eine deutlich höhere Unfallkostenrate auf. Sie war viermal so hoch, wie die des Defizits „Springen“. Einflüsse auf die Verkehrssicherheit konnten daher vorwiegend anhand des Defizits „Tauchen“ abgeschätzt werden. So stellten sich tendenziell die Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf  $V_{zul} \leq 70$  km/h, eine durchgezogene Fahrstreifenbegrenzung in Fahrbahnmitte und größere Fahrbahnbreiten ( $B \geq 6,00$  m) als vorteilhaft heraus. Konkrete Zusammenhänge zwischen den o. a. Merkmalen und der Verkehrssicherheit konnten allerdings nicht abgeleitet werden.

#### 4.6 Verdeckter Kurvenbeginn

Die in Ziffer 3.4.6 beschriebene Methode zur Berechnung verdeckter Kurvenbeginne wurde - wie auch bei den kritischen Sichtschattenbereichen - programmtechnisch umgesetzt. Insgesamt wurden mit dem Programm 2.620 verdeckte Kurvenbeginne auf den Untersuchungsstrecken detektiert. Damit tritt dieses Defizit der räumlichen Linienführung durchschnittlich alle 2,5 km auf.

Der größte Teil der detektierten Stellen liegt in Sachsen (n = 1.637). Aber auch in Brandenburg wurden 464 verdeckte Kurvenbeginne festgestellt. Defizite der räumlichen Linienführung (kritische Sichtschattenbereiche - vgl. Ziffer 4.5 - und verdeckte Kurvenbeginne) sind demnach auch in Bundesländern mit flacheren Geländestrukturen vorzufinden.

Dennoch lässt sich hier ebenfalls kein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Unfallgeschehen und Streckenabschnitten mit verdeckten Kurvenbeginn feststellen. Es zeigt sich lediglich eine leicht steigende Tendenz zwischen der Dichte an verdeckten Kurvenbeginn und den relativen Unfallkenngrößen (vgl. Abb. 4-27).

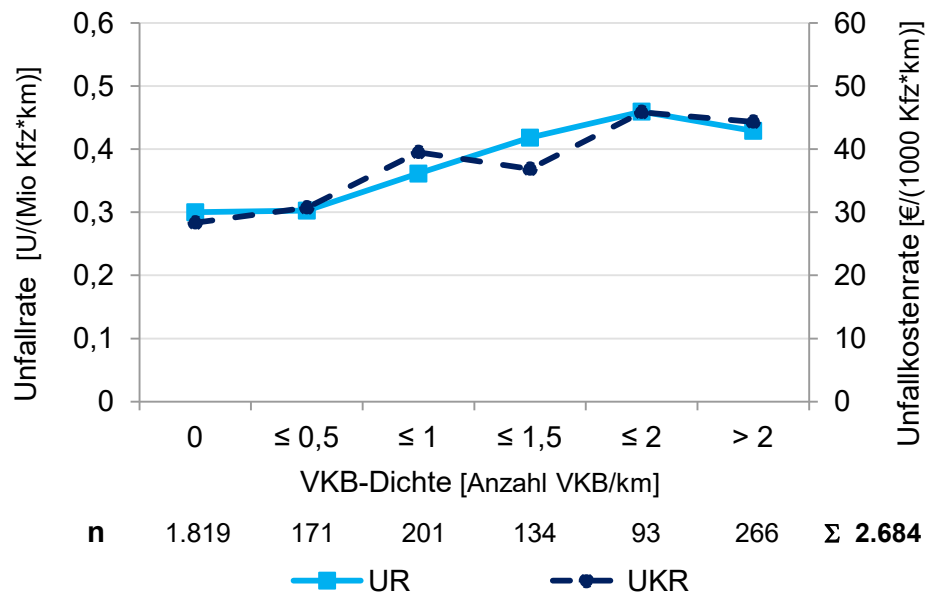


Abb. 4-27: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate von Streckenabschnitten in Abhängigkeit von der Dichte an verdeckten Kurvenbeginn

Dabei ist wiederum festzuhalten, dass nicht jedes Defizit unfallauffällig ist. Es wurden insgesamt 355 Unfälle zu 271 Bereichen zugeordnet. Damit ereignete sich nur an ca. jedem zehnten verdeckten Kurvenbeginn mindestens ein Fahr Unfall. Lediglich zwölf Bereiche erfüllen die Grenzwerte des M Uko (FGSV 2012c) nach einer Unfallhäufungsstelle.

Dabei haben Kurven mit nicht einsehbarem Beginn, aber mit relativ geringen Richtungsänderung ( $\alpha \leq 17,5$  gon), vergleichsweise geringe Unfallkennwerte. Erst ab Richtungsänderungen der Klasse 20 gon sind steigende Werte der Unfallkenngrößen festzustellen (vgl. Abb. 4-28).

Die Überlagerung verdeckter Kurvenbeginne mit den Elementrelationen des Lageplans verdeutlicht die Bedeutung der Relationstrassierung. Kurven mit nicht einsehbarem Beginn, die gemäß Ziffer 3.5.7 eine Abweichung von  $Abw \leq 25$  % haben, weisen

ähnlich hohe Unfallraten und Unfallkostenraten wie „normale“ Kurven auf (vgl. Abb. 4-29 mit Abb. 4-12/Abb. 4-15/Abb. 4-18). Bei der Abweichungsklasse 30 % steigen die Unfallkennwerte - ähnlich den Elementrelationen aller Streckenkollektive - sprunghaft an. Die Absolutwerte sind jedoch deutlich größer. Verdeckte Kurvenbeginne sind demnach besonders sicherheitskritisch, wenn die Elementfolgen deutlich außerhalb des guten Bereiches (Abw > 25 %) gemäß Abb. 2-9 und Abb. 2-10 liegen.

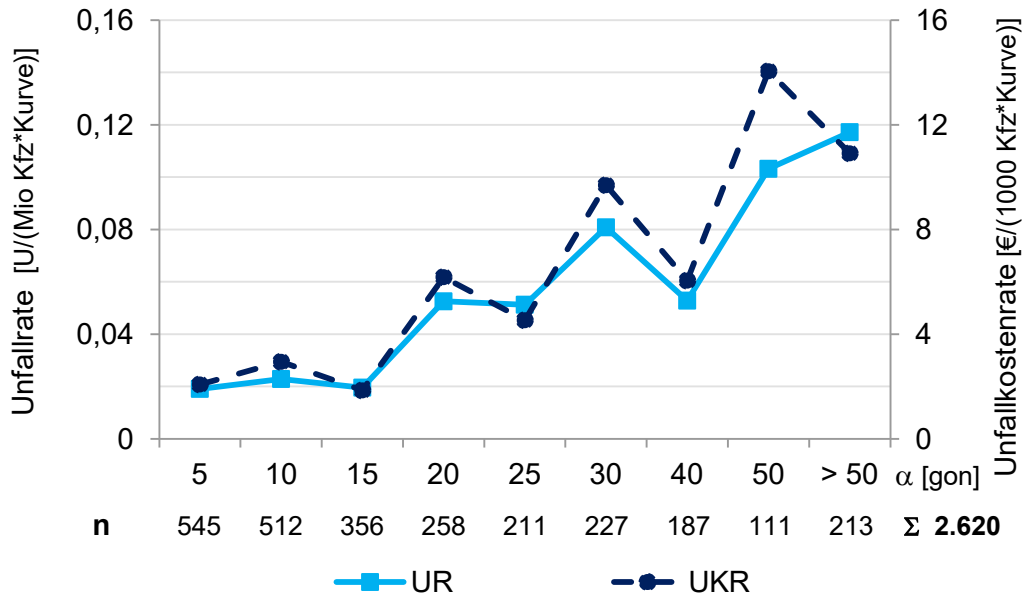


Abb. 4-28: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate verdeckter Kurvenbeginne in Abhängigkeit vom Richtungsänderungswinkel

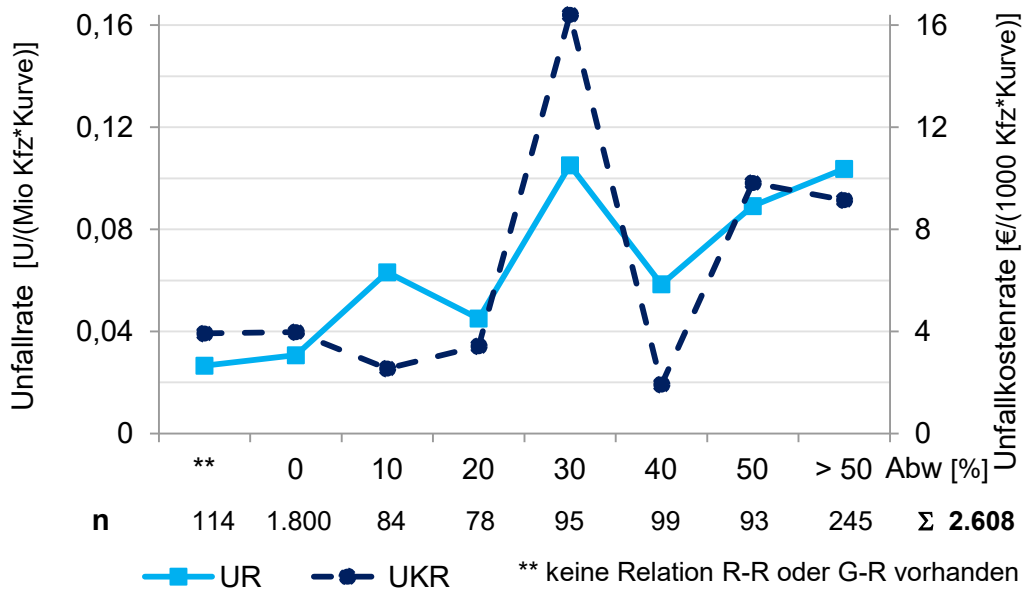


Abb. 4-29: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate verdeckter Kurvenbeginne in Abhängigkeit von der Relationstrassierung (Maß der Abweichung von R-R und G-R)

LINKE (2016) stellte in seinen Untersuchungen zu verdeckten Kurvenbeginnen fest, dass sich Unfälle dort eher bei kleineren Kurvenradien von  $R \leq 200$  m häufen. Dies war insbesondere dann sicherheitskritisch, wenn der Annäherungsbereich eine gestreckte Linienführung (geringe Kurvigkeit des Annäherungsbereichs) aufwies. Seitliche

Bepflanzungen an der Kurvenaußenseite (optische Führung) hatten sich als vorteilhaft für die Verkehrssicherheit herausgestellt. Weitere geometrische oder verkehrstechnische Zusammenhänge zur Sicherheit verdeckter Kurvenbeginnen konnten nicht ermittelt werden.

#### 4.7 Zusammenfassung

In der Literatur wurde der Einfluss bestimmter Entwurfsmerkmale auf die Verkehrssicherheit beschrieben. Diese Untersuchungen basieren zum Teil auf älteren Fahrzeugkollektiven und Strecken anderer Charakteristika. Dennoch konnten die Erkenntnisse aus der Literatur (überwiegend qualitativ) bestätigt werden.

Die Fahrbahnbreite hat einen Einfluss auf die Verkehrssicherheit. Querschnitte, deren Abmessungen schmaler als  $B = 7,00$  m sind, haben sich besonders bei nicht relationsstrassierten Streckenabschnitten als nachteilig für die Verkehrssicherheit herausgestellt. Dies bekräftigt die These von VIETEN U. A. (2010), wonach Fahrfehler bei größeren Fahrbahnbreiten besser korrigiert werden können. Es zeigt sich jedoch auch, dass die Belange der Linienführung im Lageplan stärker auf die Verkehrssicherheit wirken. Relationstrassierte Strecken weisen über alle Breitenklassen durchschnittlich nur halb so große Unfallkennwerte auf wie nicht relationstrassierte Straßenabschnitte.

Sehr kleine Kurvenradien ( $R < 125$  m) haben sich - wie auch in weiteren Untersuchungen - als sicherheitskritisch erwiesen. Der teilweise in der Literatur beschriebene Sicherheitsgewinn zunehmender Kurvenradien kann insbesondere bei längeren Kurven ( $L \geq 50$  m) pauschal nicht bestätigt werden. Es zeigt sich besonders für den Bereich von  $150 \text{ m} < R < 600$  m vielmehr die Bedeutung, die Entwurfs Elemente des Lageplans in Größe und Folge aufeinander abzustimmen (Elementrelationen).

Die Elementrelationen R-R und G-R wurden anhand klassifizierter, prozentualer Abweichungen von den Anforderungen der RAL (FGSV 2012a) bewertet. Diese Methode ermöglicht die Abgrenzung sicherheitskritischer Verhältniswerte. Relationsstrassierte Kurven(folgen) weisen dabei durchgängig geringe Unfallkennziffern auf. Ab der „Abweichungsklasse“ 30 % (Maß der Abweichung von  $25 \% < \text{Abw} \leq 35 \%$ ) ist vielfach ein sprunghafter Anstieg der Unfallkennwerte festzustellen. Dies gilt sowohl für aufeinanderfolgende Kreisbogenradien als für Radien im Anschluss an Geraden.

Die Kurvigkeitsdifferenz eignet sich ebenfalls, die Stetigkeit der Lageplanelemente einzuschätzen. Sie ergibt sich aus der Differenz von der Kurvigkeit des Einzelbogens zu der mittleren gewichteten Kurvigkeit des Annäherungsbereichs. Es hat sich - genau wie bei STEYER (2004) - eine Kurvigkeitsdifferenz von  $\Delta KU = 400$  gon/km als sicherheitskritischer Wert herausgestellt.

Zwischen der Kurvigkeit des Einzelbogens, als Maß für die einzelne Kurve, und den Unfallkennwerten stellt sich bei der gewählten Klassifizierung ein annähernd linearer Zusammenhang ohne Änderung des Anstiegs ein. Ein augenscheinlicher Schwellenwert zur Abgrenzung sicherheitskritischer Einzelkurven ist somit nicht ersichtlich.

Kritische Sichtschattenbereiche und verdeckte Kurvenbeginne sind vielfach in den historisch gewachsenen Straßennetzen vorhanden. Ihnen wird ein großer Einfluss auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit zugesprochen (FGSV 2012a). Ein allgemeiner Zusammenhang zur Verkehrssicherheit kann jedoch anhand der vorliegenden Streckenkollektive nicht abgeleitet werden. Es sind lediglich vereinzelte Bereiche unfallauffällig.

## 5 Konzept zur Berücksichtigung entwurfs- und sicherheitstechnischer Aspekte bei PMS

### 5.1 Verfahren zur entwurfstechnischen Bewertung

#### 5.1.1 Bewertungsphilosophie

Das Sicherheitsniveau einer Straße wird u. a. maßgeblich durch die geometrische Gestaltung beeinflusst. Dabei sind Straßen, die dem Stand der Technik entsprechen, nachweislich sicherer als jene, die von den Anforderungen abweichen. Der Stand der Technik wird in den entsprechenden Regelwerken der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) festgehalten und fortgeschrieben.

Als Bewertungsmaßstab werden demzufolge die derzeit gültigen Richtlinien für den Entwurf von Landstraßen herangezogen. Bei Berücksichtigung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse kann das im Folgenden vorgestellte Bewertungsverfahren entsprechend angepasst werden.

Der Entwurf von Landstraßen wird in den RAL (FGSV 2012a) geregelt. Das M EKLBest (FGSV 2018) beschreibt darüber hinaus Strategien, wie das Prinzip der Standardisierung und Wiedererkennbarkeit nach den RAL auf bestehende Landstraßen übertragen werden kann. Es werden u. a. Empfehlungen formuliert, welche Breite der jeweiligen Querschnittselemente bei abweichenden Abmessungen zu gewährleisten ist.

Auf Grundlage dieser Anforderungen werden Straßenabschnitte (vgl. Ziffer 3.4.1) getrennt nach den Entwurfsebenen „Querschnittsgestaltung“ und „Linienführung“ in drei Stufen bewertet (vgl. Tab. 5-1).

Die Aspekte der räumlichen Linienführung sind nicht Bestandteil des Bewertungsverfahrens. Da sich Bereiche mit kritischen Sichtschattenbereichen oder verdeckten Kurvenbeginnen nur sehr selten als unfallauffällig herausgestellt haben, sind diese Belange eher im Rahmen der örtlichen Unfallkommission zu untersuchen und geeignete Maßnahmen abzuleiten.

Die Ausrichtung des Bewertungsverfahrens ist für die Festlegung von Kriterien ebenfalls entscheidend. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Berücksichtigung entwurfstechnischer Aspekte beim Erhaltungsmanagement von Straßen. Für die Abschätzung des Ausbaubedarfs eines Straßennetzes treten hingegen die sicherheitstechnischen Überlegungen stärker in den Vordergrund. Das Verfahren wird daher so konzipiert, dass einzelne Bausteine der Zielstellung angepasst werden können.

Tab. 5-1: Klassifizierung der Abweichungen

Maß der Abweichung	allgemeine Beschreibung
keine Abweichung	Die Anforderungen der Regelwerke werden vollständig erfüllt.
geringe Abweichung	Die Anforderungen der Regelwerke werden nahezu erfüllt. Die Abweichungen liegen innerhalb der Sicherheitsspielräume.
hohe Abweichung	Die Anforderungen der Regelwerke werden nicht erfüllt. Das Maß der Abweichungen führt zu Einschränkungen der Verkehrssicherheit.

### 5.1.2 Linienführung im Lageplan

Grundsätzlich eignen sich sowohl die Anforderungen zu den Mindestradien und zu den Elementfolgen nach den RAL (FGSV 2012a) als auch die Kurvigkeitsdifferenzen nach SOSSOUMIHEN (2001) bzw. STEYER (2004), um die Linienführung im Lageplan zu beurteilen (vgl. Ziffer 4.3 und Ziffer 4.4). In Anlehnung an die eingangs formulierte Bewertungsphilosophie werden die Kriterien der RAL (FGSV 2012a) als Maßstab zur Einschätzung der Güte der Linienführung herangezogen.

#### Mindestradius

Nach den RAL (FGSV 2012a) werden in Abhängigkeit von der Entwurfsklasse Mindestradien gefordert (vgl. Tab. 2-11). Diese gewährleisten ein gleichmäßiges Fahren mit der aus der Netzfunktion abgeleiteten Planungsgeschwindigkeit. Aus sicherheitstechnischen Aspekten erscheint die Festlegung differenzierter Mindestwerte für Kreisbogenradien nicht erforderlich. Sehr kleine Kurvenradien ( $R < 125$  m) haben sich als besonders sicherheitskritisch herausgestellt (vgl. Ziffer 4.3). Ansonsten sind bei unterschiedlichen Radienklassen teilweise vergleichbare Unfallkostenraten festzustellen. Es ist daher vielmehr erforderlich, die Größe und Folge von Lageplanelementen aufeinander abzustimmen.

Daher werden unabhängig von der Entwurfsklasse Kreisbogenradien von  $R < 125$  m den hohen Abweichungen zugeordnet. Lediglich bei Straßen der EKL 1 wird ein Radius von  $R = 350$  m zur Abgrenzung der hohen Abweichungen herangezogen, da dieser Wert im M EKLBest (FGSV 2018) als Voraussetzung zum Betrieb einer Straße dieser Entwurfsklasse festgeschrieben ist. Dieser Wert passt zu den Erkenntnissen aus der Unfallanalyse. Insbesondere bei längeren Kurven ( $L \geq 50$  m) ist dort nochmal ein Sicherheitsgewinn festzustellen (vgl. Abb. 4-10). Weitere Abweichungsbereiche werden an dieser Stelle nicht definiert.

#### Relationstrassierung

Das Verhältnis aufeinanderfolgender Kreisbogenradien und die Größe von Kurvenradien im Anschluss an Geraden haben sich als sicherheitsrelevante Kriterien zur Bewertung der Stetigkeit der Linienführung herausgestellt. Dabei war insbesondere ab der Klasse 30 % ( $25 \% < \text{Abw} \leq 35 \%$ ) ein sprunghafter Anstieg der Unfallkennwerte zu erkennen (vgl. Ziffer 4.3). Der Wert von  $\text{Abw} = 25 \%$  wird daher als Maß zur Abgrenzung hoher Abweichungen festgelegt.

Tab. 5-2: Bewertungen des Kreisbogenradius

Maß der Abweichung	Mindestradius R in [m]	Relation R-R Abw in [%]	Relation G-R Abw in [%]
keine Abweichung	-	Abw = 0	Abw = 0
geringe Abweichung	-	$0 < \text{Abw} \leq 25$	$0 < \text{Abw} \leq 25$
hohe Abweichung	$R < 125$ ( $R < 350$ )	Abw > 25	Abw > 25

**Anmerkung:** Wert in Klammern bei EKL 1

Die jeweiligen Bewertungen zum Kreisbogenradius sind nochmal in Tab. 5-2 zusammengestellt. Die Elementrelationen (R-R und G-R) werden dabei richtungsgetreunt ausgewertet. Damit erhält jeder Kurvenradius fünf separate Einzelbewertungen. Das Maximum dieser Einzelbewertungen (also die größte Abweichung) wird letztlich dem Kurvenradius als maßgebende Bewertung zugewiesen.

### Empfehlungen für entwurfstechnische Maßnahmen - Linienführung

Besondere Einschränkungen der Verkehrssicherheit sind hauptsächlich bei hohen Abweichungen der Mindestradien und Elementfolgen festzustellen. Daher wird im Rahmen des Bewertungsverfahrens eine Anpassung der Kurvenradien nur dann vorgeschlagen, wenn hohe Abweichungen nach Tab. 5-2 vorliegen.

Die Bewertungen zu den Mindestradien und den Elementfolgen beziehen sich jeweils auf eine Kurve. Innerhalb eines Straßenabschnitts können sicherheitskritische Kurven in Lage und Anzahl variieren. Im nächsten Schritt wird somit anhand der Beurteilung der einzelnen Kurve eine Charakterisierung der Linienführung für den Straßenabschnitt vorgenommen. Dazu wird der prozentuale Anteil der Länge von Kurvenbereichen hoher Abweichung an der Gesamtlänge des Straßenabschnitts berechnet.

Zur Abschätzung eines sinnvollen Grenzwertes wurden insgesamt 126 Streckenabschnitte des Sächsischen Staatsstraßennetzes mit sicherheitskritischen Kurven untersucht. Es wurde im Straßenentwurfsprogramm CARD/1 geprüft, ob sich die jeweiligen Achselemente in Abhängigkeit von der Dichte kritischer Bereiche (prozentualer Längenanteil) unabhängig voneinander anpassen lassen. Topografische Randbedingungen wurden dabei nicht berücksichtigt. Es zeigte sich, dass ab einem Anteil von 25 % die Mehrzahl der sicherheitskritischen Kurven maßgeblich die angrenzenden Elemente beeinflussen und nicht mehr einzeln anzupassen sind. Bei geringeren Längenanteilen kehrte sich das Verhältnis um. Somit wird dieser Wert als Grenze gewählt.

Sicherheitskritische Einzelkurven, deren Anteil an der Gesamtstreckenlänge 25 % nicht überschreiten, können demnach weitgehend einzeln an die Vorgaben der Richtlinien angepasst werden. Die „Kurvenbegradigungen“ erfolgen sozusagen „elementweise“. Bei größeren Längenanteilen sind die kritischen Kreisbogenradien oft so verteilt, dass diese sich untereinander beeinflussen. Die Linienführung ist auf dem gesamten Streckenabschnitt anzupassen.

Damit ergeben sich die in Tab. 5-3 dargestellten allgemeinen Empfehlungen für entwurfstechnische Maßnahmen in Abhängigkeit vom prozentualen Längenanteil an Kurven hoher Abweichungen.

Tab. 5-3: Empfehlungen für entwurfstechnische Maßnahmen - Linienführung

Empfehlung	Längenanteil an Kurvenbereichen mit hoher Abweichung
(1) keine bauliche Maßnahme	$L_{\text{Anteil}} = 0 \%$
(2) elementweise Anpassung der Linienführung	$0 \% < L_{\text{Anteil}} \leq 25 \%$
(3) vollständige Anpassung der Linienführung	$L_{\text{Anteil}} > 25 \%$

Differenziertere Empfehlungen sind bei dieser Ebene nicht erforderlich. Zur konkreten entwurfstechnischen Maßnahmenfindung können allerdings unterstützend die sicherheitskritischen Kurven mittels Geoinformationssystemen (GIS) visualisiert werden. Entsprechende Streckenportraits wurden bereits für das Grundnetz in Brandenburg (vgl. LIPPOLD U. A. 2011b) und das Sächsische Staatsstraßennetz erarbeitet (vgl. LERCH U. A. 2014).

### 5.1.3 Querschnittsgestaltung

Das Niveau der Abweichungen wird auf Grundlage der Erkenntnisse aus den sicherheitstechnischen Untersuchungen und der Anforderungen des M EKLBest (FGSV 2018) abgeleitet. Die jeweiligen Bereichsgrenzen sind in Tab. 5-4 dargestellt. Die Aspekte zum Betrieb von Arbeitsstellen gemäß den RSA (BMV 1995) und den Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR A5.2 - ASTA 2014) sind nicht berücksichtigt. In dem Entwurf der ASR A5.2 (ASTA 2014) werden höhere Anforderungen zur sicheren Einrichtung von Arbeitsstätten definiert. Dabei werden bereits Ansätze zur Vorgehensweise bei minderbreiten Querschnitten diskutiert (vgl. ZIMMERMANN/SCHWEIGER 2016). Bei Berücksichtigung dieser Belange würden sich insbesondere für Straßen der EKL 3 und der EKL 4 größere erforderliche Querschnittsbreiten ergeben. Eine generelle Verbreiterung der Regelquerschnitte im Regelwerk aus diesem Grund ist jedoch künftig zunächst nicht zu erwarten.

Die erforderliche Fahrbahnbreite hängt von der Entwurfsklasse ab (vgl. Tab. 2-10). Voraussetzung für diesen Bewertungsschritt ist daher eine funktionale Gliederung des Straßennetzes bzw. ein entsprechender Landesverkehrsplan, wonach die Entwurfsklassen der Straßen nach den RAL (FGSV 2012a) abgeleitet bzw. übernommen werden können.

Die Regelquerschnitte der RAL (FGSV 2012a) setzen sich aus der Fahrbahnbreite (Fahrstreifen + Randstreifen + ggf. verkehrstechnischer Mittelstreifen bzw. Mittelmarkierung) und der Breite der Bankette zusammen. Bewertet wird die Breite der befestigten Fläche. Bankette sind demnach nicht Bestandteil des Bewertungsverfahrens.

Die Klassifizierung der Abweichungen für Straßen der EKL 1 wird weitgehend durch das M EKLBest (FGSV 2018) bestimmt, da dreistreifige Querschnitte nicht Bestandteil der eigenen sicherheitstechnischen Untersuchungen waren (vgl. Kapitel 4). Straßen der EKL 1 sind nach den RAL (FGSV 2012a) mit einem durchgängigen wechselseitigen Überholfahrstreifen auszubilden. Das Maß der geringen Abweichung gemäß Tab. 5-1 wird so gewählt, dass noch ein Betrieb als dreistreifiger Querschnitt möglich ist.

Straßen der EKL 2 sollen abschnittsweise Überholfahrstreifen aufweisen (ca. 20 % je Richtung). Die Anlage solcher verkehrstechnisch gesicherter Überholmöglichkeiten ist als Gesamtkonzept für einen Streckenzug zu entwickeln. Die Verteilung der Überholfahrstreifen ist demnach strategisch und individuell für jede Straße dieser Entwurfsklasse zu planen. Daher wird zur netzweiten Bewertung als Maßstab die befestigte Breite des zweistreifigen Bereichs ( $B = 8,50 \text{ m}$ ) herangezogen. Fahrbahnbreiten von  $B \geq 7,50 \text{ m}$  erwiesen sich sowohl bei diesen Untersuchungen als auch in der Literatur als sicher (vgl. z. B. PALM/SCHMIDT 1999, VIETEN U. A. 2010). Fahrbahnbreiten zwischen  $7,50 \text{ m} \leq B < 8,50 \text{ m}$  werden folglich den geringen Abweichungen zugeordnet.



Straßen der EKL 3 sind als zweistreifiger Querschnitt mit einer Breite der befestigten Fläche von  $B = 8,00$  m zu gestalten. Fahrbahnbreiten von  $B \geq 7,00$  m haben sich bei VIETEN U. A. (2010) wie auch in diesen Untersuchungen als vergleichsweise sicher herausgestellt. Schmalere Fahrbahnen weisen zunehmend höhere Unfallkennwerte auf. Der größte absolute Sicherheitsgewinn ist zwischen den mittleren Fahrbahnbreiten  $B = 6,50$  m und  $B = 7,00$  m zu verzeichnen (vgl. Abb. 4-3). Dies trifft insbesondere für nicht relationstrassierte Streckenabschnitte zu (vgl. Abb. 4-6). Der geringe/hohe Abweichungsbereich gemäß Tab. 5-1 kann demzufolge durch den Wert von  $B = 7,00$  m gut abgegrenzt werden.

Das M EKLBest (FGSV 2018) führt allerdings noch weitere Minderbreiten von bis zu  $B = 6,00$  m an, um einen Streckenabschnitt als Straße der EKL 3 auszuweisen. Bei relationstrassierten Straßenabschnitten sind auch schmalere Querschnitte vergleichsweise sicher (vgl. Abb. 4-6). Abb. 4-2 verdeutlicht zudem, dass ein großer Teil der bestehenden Landstraßen schmale Fahrbahnen aufweist. Etwa drei Viertel der Streckenabschnitte des Untersuchungskollektivs haben Fahrbahnbreiten von  $B < 7,00$  m. Bei einer starren Grenze zum Bereich der hohen Abweichungen von  $B = 7,00$  m würden die Bewertungsergebnisse den Bestand nicht ausreichend differenziert abbilden.

Nach dem Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau Nr. 08/2013 können für Straßen der EKL 3 bei geringen Verkehrsstärken ( $DTV \leq 4.000$  Kfz/24 h) schmalere Fahrbahnen vorgesehen werden. Die Analyse der Fahrbahnbreiten getrennt nach den aufgeführten Verkehrsbelastungen zeigt, dass der Sicherheitsgewinn zwischen den Breitenklassen 6,00 m und 7,00 m sich sowohl bei geringen als auch bei höheren Verkehrsbelastungen einstellt (vgl. Anhang E - Abb. E-1 und Abb. E-2). Bei ausschließlicher Betrachtung relationstrasierter Streckenabschnitte ist dieser Unterschied allerdings nicht mehr so stark ausgeprägt (vgl. Abb. 4-6). Die Unfallanalysen zu den Fahrbahnbreiten relationstrasierter Streckenabschnitte differenziert nach dem DTV zeigen zudem, dass die Unterschiede in den Unfallkenngrößen hauptsächlich auf Straßen mit höherem Verkehrsaufkommen ( $DTV > 4.000$  Kfz/24 h) zurückzuführen sind. Bei Straßenabschnitten mit einer Verkehrsbelastung von bis zu  $DTV \leq 4.000$  Kfz/24 h sind nur noch geringe Sicherheitsvorteile zwischen den genannten Breitenklassen festzustellen (vgl. Anhang E - Abb. E-3 und Abb. E-4).

Die Einstufung der geringen/hohen Abweichung bei Straßen der EKL 3 erfolgt somit in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung. Die Grenze zum hohen Abweichungsbereich wird bei Verkehrsstärken von  $DTV \leq 4.000$  Kfz/24 h - um 1,00 m reduziert - auf eine Breite der befestigten Fläche von  $B = 6,00$  m festgelegt. Bei höheren Verkehrsbelastungen ist ein Mindestmaß von  $B = 7,00$  m anzusetzen.

Für Straßen der EKL 4 ist nach den RAL (FGSV 2012a) ein einbahniger Querschnitt mit einer Fahrbahnbreite von  $B = 6,00$  m ohne Mittelmarkierung zur Fahrtrichtungstrennung vorgesehen. Der Querschnitt erhält lediglich eine um 0,50 m seitlich eingerückte Markierung (Leitlinien). Der Abstand zwischen den seitlichen Leitlinien und den Fahrbahnrändern soll nach dem M EKLBest (FGSV 2018) auch bei Minderbreiten aufrechterhalten werden. Es wird demnach nur die Breite der Kernfahrbahn angepasst.

SCHLAG U. A. (2013) untersuchten das Geschwindigkeits-, Spur- und Blickverhalten sowie das Unfallgeschehen des neuen Querschnittstyps. Bei dem im Kollektiv vorhandenen Fahrbahnbreiten ( $5,00 \text{ m} \leq B \leq 6,00 \text{ m}$ ) konnten keine kritischen Verhaltensweisen festgestellt werden. In diesen Untersuchungen stellten sich auch bei noch schmaleren Querschnitten mit Breiten von bis zu  $B = 4,00$  m keine Unfallauffälligkeiten

ein (vgl. Abb. 4-7). Die Grenze zum hohen Abweichungsbereichs leitet sich daher aus dem Mindestmaß des M EKLBest (FGSV 2018) ab, wonach der Streckenabschnitt noch als Straße der EKL 4 markiert werden kann ( $B = 4,00$  m).

Die Einstufung der Fahrbahnbreite in das Maß der Abweichung gemäß Tab. 5-1 differenziert nach den Entwurfsklassen ist nochmal in Tab. 5-4 zusammengefasst.

Tab. 5-4: Bewertungen der Fahrbahnbreite

Anforderung/ Maß der Ab- weichung ge- mäß Tab. 5-1	EKL 1 B in [m]	EKL 2 B in [m]	EKL 3 B in [m]	EKL 4 B in [m]
RAL (FGSV 2012a)	$B = 12,50$	$B = 12,50 /$ $B = 8,50$	$B = 8,00$	$B = 6,00$
M EKLBest (FGSV 2018)	$B \geq 11,50$	$B \geq 7,50$	$B \geq 6,00$	$4,00 \leq B < 6,50$
keine Abw.	$B \geq 12,50$	$B \geq 8,50$	$B \geq 8,00$	$B \geq 6,00$
geringe Abw.	$11,50 \leq B < 12,50$	$7,50 \leq B < 8,50$	$7,00 \leq B < 8,00$ ( $6,00 \leq B < 8,00$ )	$4,00 \leq B < 6,00$
hohe Abw.	$B < 11,50$	$B < 7,50$	$B < 7,00$ ( $B < 6,00$ )	$B < 4,00$

**Anmerkung:** Werte in Klammern bei  $DTV \leq 4.000$  Kfz/24 h

### Empfehlungen für entwurfstechnische Maßnahmen - Querschnittsgestaltung

Straßenabschnitte, die nur geringe Abweichungen im Querschnitt aufweisen, sind noch als sicher einzuschätzen. Hier werden keine baulichen Maßnahmen empfohlen. Liegen auf einem Streckenabschnitt hohe Abweichungen im Querschnitt gemäß Tab. 5-4 vor, wird die Verbreiterung des Querschnitts vorgeschlagen. Querschnittsverbreiterungen sind linienhaft für den gesamten Straßenabschnitt durchzuführen und können in Kombination mit den Empfehlungen für die Linienführung auftreten. Es werden daher zu den Empfehlungen aus Ziffer 5.1.2 folgende weitere allgemeine Empfehlungen für entwurfstechnische Maßnahmen abgeleitet:

- (4) Querschnittsverbreiterung,
- (5) Querschnittsverbreiterung mit elementweiser Anpassung der Linienführung und
- (6) Querschnittsverbreiterung mit vollständiger Anpassung der Linienführung.

### 5.1.4 Ableitung von Um-/Ausbauempfehlungen

Die entwurfstechnischen Empfehlungen hängen letztlich von den jeweiligen Bewertungen aus den Entwurfsebenen „Linienführung“ und „Querschnittsgestaltung“ ab. Sie sind in Tab. 5-5 als Matrix zur Ableitung der allgemeinen Um-/Ausbauempfehlungen dargestellt.

Tab. 5-5: Matrix zur Ableitung der Um-/Ausbauempfehlungen

Linienführung		Längenanteil an Kurvenbereichen mit hoher Abweichung		
		$L_{\text{Anteil}} = 0 \%$	$0 \% < L_{\text{Anteil}} \leq 25 \%$	$L_{\text{Anteil}} > 25 \%$
Querschnitt	keine/geringe Abweichung	(1) keine bauliche Maßnahme	(2) elementweise Anpassung der Linienführung	(3) Anpassung der Linienführung
	hohe Abweichung	(4) Querschnittsverbreiterung	(5) Querschnittsverbreiterung mit elementweiser Anpassung der Linienführung	(6) Querschnittsverbreiterung mit Anpassung der Linienführung

Auf Grundlage dieser Empfehlungen können zudem anhand pauschaler Kostensätze die erforderlichen Ausbaukosten abgeschätzt werden. Der Bund beabsichtigt, im Zuge der Einführung der AKVS (2014) länderspezifische Preistabellen bereitzustellen und zu pflegen. Damit könnten zukünftig aktuelle und regional angepasste pauschale Kostensätze abgeleitet werden.

## 5.2 Maßnahmen für Pavement-Management-Systeme (PMS)

Unter Pavement Management wird die systematische Erfassung aller für die bauliche Erhaltung der Straße notwendigen Informationen verstanden. Pavement-Management-Systeme (PMS) empfehlen auf Grundlage dieser Straßenzustandsdaten und des zur Verfügung stehenden Finanzrahmens Erhaltungsmaßnahmen für einen definierten Zeitraum (vgl. Ziffer 2.2.4).

Erhaltungsmaßnahmen verbessern den Straßenzustand. Vor allem Erneuerungsmaßnahmen (E1 und E2 gemäß Tab. 5-6) vermitteln dabei den Eindruck einer neuen und richtliniengerechten Straße, was erfahrungsgemäß zu einem höheren Geschwindigkeitsniveau führt. Sind auf dem Streckenabschnitt entwurfstechnische Defizite vorhanden, kann das die Verkehrssicherheit beeinträchtigen. Es sind daher bei vorliegenden Defiziten in der Straßengeometrie nur bestimmte Erhaltungsmaßnahmen bzw. ergänzende Maßnahmen zu empfehlen. Damit wird darüber hinaus ein sinnvoller Einsatz der finanziellen Mittel gewährleistet.

Die Unfallauswertungen in Kapitel 4 zeigen, dass sowohl die Fahrbahnbreite als auch die Linienführung im Lageplan Einfluss auf die Verkehrssicherheit haben. Sie verdeutlichen aber auch, dass die Aspekte der Linienführung (insbesondere der Relations-trassierung) in einem stärkeren Maße auf die Sicherheit von Straßenabschnitten im

Bestand wirken. Der Sicherheitsvorteil breiterer Querschnitte stellt sich vorwiegend bei nicht relationstrassierten Strecken ein. Daher werden bei der entwurfstechnischen Bewertung für PMS nur die Belange der **Linienführung im Lageplan** berücksichtigt. Das hat auch den Vorteil, dass bei entwurfstechnischen Anpassungen im Zuge von Erhaltungsmaßnahmen die formalen Baurechtsverfahren ggf. vereinfacht werden können. Bei der linienhaften Verbreiterung des Querschnitts im gesamten Straßenabschnitt wäre es hingegen im Allgemeinen erforderlich, Grunderwerb mit mehreren Beteiligten durchzuführen.

### 5.2.1 Begriffe der Baulichen Erhaltung

Die Bauliche Erhaltung ist ein Sammelbegriff für Maßnahmen, die der Substanzerhaltung und der Erhaltung des Gebrauchswertes für den Straßennutzer dienen.

Die Erneuerung umfasst die vollständige Wiederherstellung einer vorhandenen Straßenbefestigung oder Teilen davon ohne Grunderwerb, sofern mehr als nur die Deckschicht betroffen ist.

Die Instandsetzung enthält Maßnahmen, welche deutlich über bauliche Sofortmaßnahmen oder Maßnahmen kleineren Umfangs hinausgehen, aber keine Erneuerung von Straßenbefestigungen darstellen.

Tab. 5-6: Übersicht zur Begriffssystematik im Straßenbau - bauliche Erhaltung (in Anlehnung an WELLNER 2015)

<b>Bauliche Erhaltung</b>	<b>Bauliche Unterhaltung</b> (örtlich punktuelle oder kleinflächige Maßnahmen, z. B. Vergießen von Rissen)	
	<b>Instandsetzung</b>	I 1 - auf der Deckschicht (z. B. Oberflächenbehandlung, Dünnschichtbelag)
		I 2 - an der Deckschicht (z. B. Hoch/Tiefereinbau der Deckschicht)
	<b>Erneuerung</b>	E 1 - an der Decke (z. B. Hoch- oder Tiefereinbau der DS/BS)
		E 2 - an Tragschicht(en) / am Oberbau (z. B. Verstärkung, Tiefereinbau Tragschicht(en))

#### Definitionen

- Deckschicht: oberste Schicht (i. d. R. 4 cm)
- Decke: bestehend aus Deckschicht (i. d. R. 4 cm) und Binderschicht (i. d. R. 8 cm)
- Oberbau: bestehend aus Deckschicht, Binderschicht, Tragschicht und FSS
- Hocheinbau: ohne Abfräsen der vorhandenen Schichten
- Tiefereinbau: Abfräsen der vorhandenen Schichten
- Verstärkung: Einbau von einer oder mehreren zusätzlichen Schichten auf die vorhandene Straßenbefestigung

### 5.2.2 Struktur und Aufbau von PMS

Pavement-Management-Systeme sind grundlegend in zwei Programmteile strukturiert. Die Datenhaltung sowie die Ergebnisaufbereitung und -visualisierung erfolgen in einem PMS-Input/Output-Programm (PMS-I/O). Das eigentliche Berechnungs- und Optimierungsprogramm ist in einem separaten Teil ausgelagert. Diese Grundstruktur ist schematisch in Abb. 5-1 dargestellt.

Die beiden Programmteile sind modular aufgebaut. Dies ermöglicht es, einzelne Fachkomponenten zu ergänzen oder durch weiterentwickelte, verbesserte Versionen auszutauschen. Damit können modifizierte Fachkomponenten in das PMS eingebunden und getestet werden, ohne die Arbeitsfähigkeit des Systems einzuschränken.

Der Ablauf von Pavement-Management-Systemen umfasst vereinfacht dargestellt folgende grundlegende Arbeitsschritte (vgl. LERCH U. A. 2014):

- 1) Auswahl des Analysenetzes und Bildung homogener Abschnitte,
- 2) Vorgabe des Prognose- und Betrachtungszeitraums sowie der jeweiligen Budgetansätze,
- 3) Ermittlung des Verlaufes der Zustandsmerkmale für das Szenario „Nichts tun“,
- 4) Bestimmung der Eingreifjahre im Prognosezeitraum,
- 5) Überprüfung der jeweiligen Zustandskonstellationen zur Ermittlung der möglichen Schadensursachen und Filterung von technisch zulässigen Maßnahmen,
- 6) Bewertung der zulässigen Maßnahmen (Rücksetzwerte für die einzelnen Zustandsgrößen, Zustandsentwicklung nach Maßnahme, NKV) und
- 7) Reihung aller Maßnahmenvarianten je Abschnitt und Zuordnung der optimalen Maßnahmen für den vorgegebenen Budgetrahmen.

KRAUSE/MAERSCHALK (2010) erarbeiteten u. a. ein Feinkonzept zur Weiterentwicklung des Gesamtsystems unter Berücksichtigung neuer Elemente und Verfahren. Sie fassten ihre Empfehlungen für neue und modifizierte Module tabellarisch zusammen (vgl. Anhang J - Tab. J-1).

Für diese Arbeit sind besonders die Module Nr. 12 „Auswahl technisch zulässiger Maßnahmen“ und Nr. 18 „Reihung der Maßnahmen“ relevant. KRAUSE/MAERSCHALK (2010) erkannten zudem, dass eine zusätzliche Fachkomponente zum Um- und Ausbau notwendig ist (Modul Nr. 15 „Um- und Ausbau: Maßnahmewahl, Kosten, Auswirkungen“). Sie empfahlen allerdings, dieses Modul im Sinne einer zeitnahen Umsetzung des Gesamtsystems vorerst zurückzustellen.

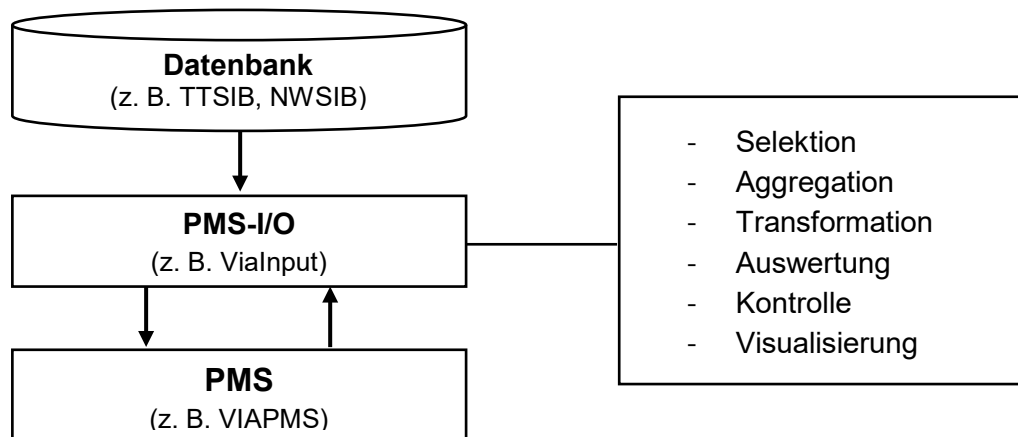


Abb. 5-1: Schemadarstellung für den Datenfluss in PMS (KRAUSE/MAERSCHALK 2010)

### 5.2.3 Wahl der Erhaltungsmaßnahmen in PMS

Pavement-Management-Systeme fassen die Auswerteabschnitte der Zustandserfassung und -bewertung nach den ZTV ZEB-StB (FGSV 2006) zu längeren Erhaltungsabschnitten mit ähnlicher Charakteristik zusammen (homogene Abschnitte). Anhand von Verhaltensfunktionen/-kurven wird die Entwicklung der relevanten Zustandsgrößen

abgeschätzt. Im nächsten Arbeitsschritt werden Mängelklassen gebildet, auf deren Grundlage die Erhaltungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Mängelklassen beschreiben mögliche Schadensursachen und lassen näherungsweise Rückschlüsse auf die betroffenen Befestigungsschichten zu. Sie werden anhand der Zustandswerte der jeweiligen Zustandsmerkmale und ggf. des Befestigungsaufbaus zugeordnet. Eine Mängelklasse kann dabei nur ermittelt werden, wenn mindestens ein Zustandsmerkmal den Warnwert (Zustandswert = 3,5) überschreitet (KRAUSE 2001).

Nach Abgrenzung der Mängelklassen werden für die möglichen Maßnahmentearten (vgl. Anhang J - Tab. J-2) die direkten Maßnahmewirkungen und die Verhaltensänderungen nach Maßnahmedurchführung abgeschätzt. Damit wird für die jeweilige Maßnahme bzw. Maßnahmenfolge ein Nutzen<sup>17</sup>-Kosten-Verhältnis (NKV) bestimmt. Die Erhaltungsmaßnahmen werden letztlich anhand dieses Verhältniswertes und der zulässigen Anwendungsbereiche gewählt (MAERSCHALK/KRAUSE 2004).

Anwendungsbereiche ermöglichen das „Ausblenden von Erhaltungsmaßnahmen“ aufgrund nicht sinnvoller (z. B. Maßnahmen, die nicht zu einer ausreichenden Dickenbemessung führen) oder technisch nicht möglicher (z. B. Hocheinbau bei Höhenbindungen) Maßnahmenvorschläge. Entsprechende Randbedingungen und Einschränkungen sind in MAERSCHALK/KRAUSE (2004) - Anlage A zusammengefasst.

#### 5.2.4 Ableitung zulässiger Erhaltungsmaßnahmen für PMS

Die in Ziffer 5.2.3 beschriebenen Anwendungsbereiche können um die Aspekte der Linienführung im Lageplan erweitert werden. Dazu sind zunächst die in PMS möglichen Erhaltungsmaßnahmen (vgl. Anhang J - Tab. J-2) hinsichtlich ihres Umfangs in Maßnahmen der Instandsetzung (I1 und I2) und der Erneuerung (E1 und E2) gemäß Tab. 5-6 zu gruppieren.

Aus der Systematik zur Ableitung entwurfstechnischer Maßnahmen für die Entwurfs-ebene „Linienführung“ (vgl. Tab. 5-3) ergeben sich auch die zulässigen Erhaltungsmaßnahmen in Tab. 5-7.

Tab. 5-7: Ableitung zulässiger Erhaltungsmaßnahmen

Linienführung	Längenanteil an Kurvenbereichen mit hoher Abweichung		
	$L_{\text{Anteil}} = 0 \%$	$0 \% < L_{\text{Anteil}} \leq 25 \%$	$L_{\text{Anteil}} > 25 \%$
zulässige Erhaltungsmaßnahmen	keine Beschränkung	I1 zulässig, I2/E1 + ergänzende Maßnahmen, E2 verboten	I1 zulässig, I2 + ergänzende Maßnahmen, E1 und E2 verboten

Generell sind bauliche Erhaltungsmaßnahmen der Kategorie I1 immer möglich. Bei Straßenabschnitten, die keine Kurven mit hohen Abweichungen gemäß Ziffer 5.1.2 bzw. Tab. 5-2 aufweisen, sind - aus entwurfstechnischer Sicht - alle Maßnahmen der baulichen Erhaltung zulässig.

<sup>17</sup> Nutzen als qualitatives Kriterium, bestimmt durch die Fläche zwischen den Verhaltenskurven gemäß Abb. 2-12

Auf Strecken, die Kurvenbereiche mit hohen Abweichungen haben, sind E2-Maßnahmen verboten. Dies trifft bei größeren Längenanteilen ( $L_{\text{Anteil}} > 25 \%$ ) auch für Maßnahmen der Kategorie E1 zu.

Bei einer elementweisen Anpassung der Linienführung gemäß Tab. 5-3 sind bauliche Erhaltungsmaßnahmen der Kategorie I2 und E1 zulässig, wenn nachstehende ergänzende Maßnahmen geprüft und ggf. vorgesehen werden. Bei größeren Anteil von Kurvenbereichen mit hohen Abweichungen ( $L_{\text{Anteil}} > 25 \%$ ) ist dies nur noch für I2-Maßnahmen möglich.

Nach dem Maßnahmenkatalog gegen Unfallhäufungen (MaKaU - vgl. WOLF U. A. 2018) werden für nicht abgestimmte Elementfolgen oder schlecht einsehbare Kurven folgende verkehrsrechtliche bzw. verkehrstechnische Maßnahmen vorgeschlagen:

- Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (Z 274),
- Anordnung von Richtungstafeln (Z 625) und
- Ankündigen der Kurve mittels Kurvenzeichen (Z 103) und verkürzter Abstände der Leitpfosten.

RUHE (2016) stellte in ihren Untersuchungen zu sicherheitskritischen Kurvenbereichen fest, dass sich vor allem Geschwindigkeitsbeschränkungen positiv auf die Verkehrssicherheit auswirken.

Es wird daher empfohlen, die Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit als ergänzende Maßnahme zu prüfen und ggf. vorzusehen. Um die Akzeptanz der Verkehrsteilnehmer für Geschwindigkeitsbeschränkungen zu erhöhen, ist es zweckmäßig, Grund und Länge der Begrenzung anzugeben.

### **5.2.5 Berücksichtigung von Um- und Ausbaumaßnahmen in PMS**

Mehrmals aufeinanderfolgende zulässige Erhaltungsmaßnahmen nach Ziffer 5.2.4 können für den gewählten Betrachtungszeitraum unwirtschaftlich werden. Weiterhin können diese Erhaltungsmaßnahmen durch die bereits bestehenden Anwendungsbereiche (vgl. Ziffer 5.2.3) abgegrenzt werden. Um- und Ausbaumaßnahmen sind daher zukünftig als Empfehlungen in Pavement-Management-Systeme einzubinden.

KRAUSE/MAERSCHALK (2010) empfahlen bereits, im PMS-I/O eine Option zur gesonderten Eingabe von Um- und Ausbauempfehlungen vorzusehen, um „feste Maßnahmen“ besser definieren und berücksichtigen zu können. Unwirtschaftliche Empfehlungen bei kurz- oder mittelfristig geplanten Um- und Ausbaumaßnahmen könnten somit ausgeschlossen werden. Zu diesem Zwecke ist eine neue Budgetkategorie „Um- und Ausbau“ einzuführen, da die entsprechenden finanziellen Mittel nicht aus dem Erhaltungstitel bezogen werden.

Darüber hinaus schlugen KRAUSE/MAERSCHALK (2010) vor, ein Modul zur Auswahl und Bewertung von Um- und Ausbaumaßnahmen für das PMS zu entwickeln, welches u. a. Maßnahmen wie Fahrbahnverbreiterungen (einschließlich Fahrstreifenerweiterung) und Kurvenbegradigungen umfassen sollte. Entsprechende Auswahlkriterien lagen allerdings noch nicht vor.

Der erste Baustein für ein entsprechendes Modul kann anhand des vorliegenden Verfahrens abgeleitet werden. Die entwurfstechnischen Maßnahmen zur Verbesserung der Linienführung ergeben sich analog zur Wahl zulässiger Erhaltungsmaßnahmen aus dem Längenanteil an Kurvenbereichen mit hoher Abweichung (vgl. Tab. 5-8).

Die anzupassenden Kurvenbereiche können anhand des vorgestellten Verfahrens lokalisiert und längenmäßig erfasst werden. Dies ermöglicht es, die Kosten für den Um- und Ausbau abzuschätzen.

Damit ist eine Komponente für die im PMS bestehende Systematik zur Bewertung von Maßnahmen nach dem Nutzen-Kosten-Verhältnis gegeben. Der Nutzen von Um- und Ausbaumaßnahmen beschränkt sich allerdings nicht nur auf die Verbesserung des Straßenzustandes (Fläche zwischen den Verhaltenskurven gemäß Abb. 2-12). Der Wert des Nutzens ist daher für diese Maßnahmen um ein Maß zu erweitern, welches die Verbesserung der aktiven Sicherheit des jeweiligen Straßenabschnitts wiedergibt.

Tab. 5-8: Um-/Ausbauempfehlungen für PMS

Linienführung	Längenanteil an Kurvenbereichen mit hoher Abweichung		
	$L_{\text{Anteil}} = 0 \%$	$0 \% < L_{\text{Anteil}} \leq 25 \%$	$L_{\text{Anteil}} > 25 \%$
Um-/Ausbauempfehlung	keine entwurfstechnische Maßnahme	elementweise Anpassung der Linienführung (Kurvenbegradigung)	vollständige Anpassung der Linienführung

Gemäß der in Ziffer 5.2 formulierten Ansätze berücksichtigt das vorgestellte Konzept zur Einbindung von Um- und Ausbaumaßnahmen in Pavement-Management-Systeme nur die Entwurfsebene „Linienführung“. Dieses Konzept könnte bei Bedarf um die Aspekte der Querschnittsgestaltung entsprechend der in Ziffer 5.1.3 dargestellten Methode ergänzt werden.

### 5.2.6 Bewertung von Maßnahmen in PMS

Erhaltungsmaßnahmen werden in Pavement-Management-Systemen (PMS) anhand des Nutzen-Kosten-Verhältnisses abgeleitet (vgl. Ziffer 5.2.3). Der Nutzen ergibt sich derzeit nach Gl. 5-1 (MAERSCHALK/KRAUSE 2004). Bei großen DTV-Spreizungen in dem betrachteten Straßennetz wird zum Teil auch mit der Wurzel aus dem DTV gerechnet (KRAUSE 2018).

$$N_j = \sum_{t=1}^n \Delta F_k * L_j * DTV_j * (1 + t_m * c) * (1 + p)^{-t_m} \quad \text{Gl. 5-1}$$

$N_j$	[-]	Nutzen des j-ten Abschnitts
$\Delta F_k$	[-]	Flächendifferenz der Verhaltenskurven mit einer Maßnahmeart k und ohne Maßnahme („Nichts-tun“)
$L_j$	[-]	Länge des j-ten Abschnitts
$DTV_j$	[KFZ/24 h]	durchschnittlicher täglicher Verkehr des j-ten Abschnitts
$t_m$	[a]	Jahr der Maßnahme
$c$	[-]	Zuwachsfaktor für den DTV
$p$	[-]	(inflationbereinigte) Diskontrate

Die Flächendifferenz zwischen den Verhaltenskurven gemäß Abb. 2-12 als qualitatives Maß zur Beurteilung des Nutzens einer Maßnahme wird demnach über das Verkehrsaufkommen gewichtet. Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen nutzen z. B. für ihre koordinierte Erhaltungsplanung der Bundesfernstraßen ebenfalls den DTV und



den DTV-SV als Wichtungsfaktoren ( $0,5 \leq F_{DTV} \leq 1,5$ ), um ihre Erhaltungsabschnitte zu priorisieren (vgl. HOLLATZ 2013 und SCHMIDT 2013).

Diese Systematik zur Berechnung des Nutzens kann um einen normierten Wert, der die zu erwartenden Sicherheitsvorteile von Um- und Ausbaumaßnahmen berücksichtigt, erweitert werden.

### Wichtungsfaktor für Um- und Ausbaumaßnahmen

Die Verkehrssicherheit wird durch Um- und Ausbaumaßnahmen i. A. verbessert. Es ist daher zielführend, den Nutzen von entwurfstechnischen Verbesserungsmaßnahmen über vermiedene Straßenverkehrsunfälle abzuschätzen.

Die Unfallkostendichte (UKD) beziffert den durchschnittlichen volkswirtschaftlichen Verlust infolge von Straßenverkehrsunfällen (vgl. Ziffer 3.5.1). Die Grundunfallkostendichte (gUKD) beschreibt dabei den Sicherheitsgrad, der auf einer regelkonform ausgebauten Straße zu erwarten ist. Sie errechnet sich als Produkt der Grundunfallkostenrate (gUKR) und der Verkehrsstärke (vgl. Gl. 5-2).

$$gUKD_j = gUKR * DTV_j * 365/10^6 \quad \text{Gl. 5-2}$$

$gUKD_j$	[1000 €/(km*a)]	Grundunfallkostendichte des j-ten Abschnitts
$gUKR$	[€/(1000 Kfz*km)]	Grundunfallkostenrate
$DTV_j$	[Kfz/24 h]	durchschnittlicher täglicher Verkehr des j-ten Abschnitts

Die Grundunfallkostenrate hängt von der Straßenkategorie ab (vgl. Tab. 5-9).

Tab. 5-9: Grundunfallkostenraten (gUKR) nach FGSV 2003b

Grundunfallkostenraten gUKR*		
[€/(1000 Kfz*km)]		
ausgewertete Unfallkategorien	P, SS Kat. 1 bis 4 und 6	P, S Kat. 1 bis 6
Autobahnen	11	15
Landstraßen	28	35
Stadtstraßen	29	51

\* Preisstand 2000

Aus der Differenz zwischen der Unfallkostendichte nach Gl. 3-15 und der Grundunfallkostendichte ergibt sich nach Gl. 5-3 das sogenannte Sicherheitspotenzial (SIPO). Es beschreibt den möglichen Sicherheitsgewinn bei richtlinienkonformem Um- und Ausbau von Straßen.

$$SIPO_j = UKD_j - gUKD_j \quad \text{Gl. 5-3}$$

$SIPO_j$	[1000 €/(km*a)]	Sicherheitspotenzial des j-ten Abschnitts
$UKD_j$	[1000 €/(km*a)]	Unfallkostendichte des j-ten Abschnitts
$gUKD_j$	[1000 €/(km*a)]	Grundunfallkostendichte des j-ten Abschnitts

Der volkswirtschaftliche Verlust kann letztlich anhand der „vermeidbaren Unfallkosten“ (vUK) abgeschätzt werden. Dieser Wert berechnet sich aus dem Sicherheitspotenzial und der dazugehörigen Länge des Straßenabschnitts nach Gl. 5-4.

$$vUK_j = SIPO_j * L_j \quad \text{Gl. 5-4}$$

vUK <sub>j</sub>	[1000 €/a]	vermeidbare Unfallkosten des j-ten Abschnitts
SIPO <sub>j</sub>	[1000 €/(km*a)]	Sicherheitspotenzial des j-ten Abschnitts
L <sub>j</sub>	[km]	Länge des j-ten Abschnitts

EBERSBACH/SCHÜLLER (2007) empfehlen, für die Festlegung einer Prioritätenreihung den Wert der vermeidbaren Unfallkosten in folgende vier Klassen einzuteilen:

- Strecken mit hohem Sicherheitspotenzial - hohe Priorität (vUK ≤ 20 %),
- Strecken mit mittlerem Sicherheitspotenzial - mittlere Priorität (20 % < vUK ≤ 60 %),
- Strecken mit niedrigem Sicherheitspotenzial - niedrige Priorität (60 % < vUK ≤ 100 %) und
- Strecken ohne Sicherheitspotenzial.

Die Streckenabschnitte werden dazu nach der Höhe der vermeidbaren Unfallkosten absteigend gereiht. Der Wert der vermeidbaren Unfallkosten wird im nächsten Schritt so lange kumuliert, bis 20 % der Gesamtsumme der vermeidbaren Unfallkosten erreicht sind. Diese Strecken - sozusagen die obersten 20 % - werden der hohen Priorität zugeordnet. Die weiteren Strecken mit „positivem Sicherheitspotenzial“ werden gleichverteilt in die Klassen mittlere (20 % < vUK ≤ 60 %) und niedrige (60 % < vUK ≤ 100 %) Priorität eingruppiert. Die Streckenabschnitte, deren tatsächliche Unfallkosten (Unfallkostendichte) niedriger sind als die Grundunfallkostendichte, haben kein Sicherheitspotenzial. Sie bilden die letzte Gruppe. Diese Form der Klassifizierung lässt sich über die Lorenzkurve veranschaulichen (vgl. Abb. 5-2).

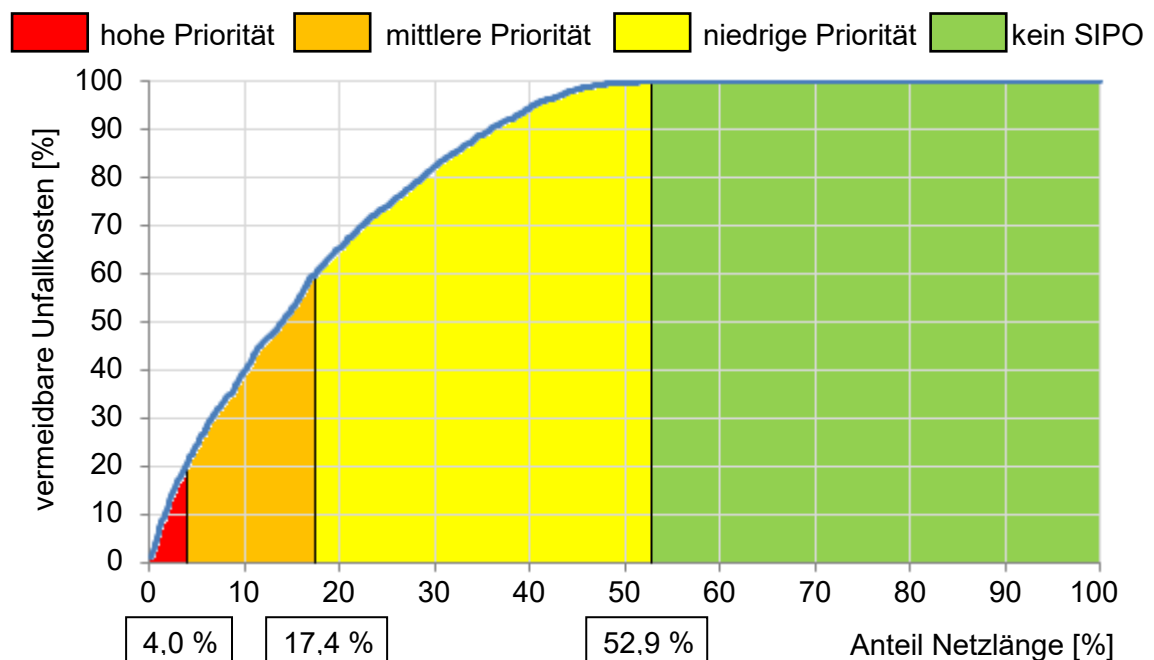


Abb. 5-2: Lorenzkurve der vermeidbaren Unfallkosten (Streckenkollektiv 4)

Hierzu wird die Höhe der vermeidbaren Unfallkosten als Summenlinie über der Netzlänge abgebildet. Bei dieser Darstellungsweise (am Beispiel des Streckenkollektivs 4) ist gut zu erkennen, dass z. B. bei einem richtlinienkonformen Ausbau von lediglich 4,0 % des entsprechenden Straßennetzes 20 % der Unfallkosten vermieden werden könnten.

Der Wichtungsfaktor ( $F_{SIPO}$ ) für Um- und Ausbaumaßnahmen ergibt sich auf Grundlage dieser Klassifizierung nach Tab. 5-10. Er kann als weiterer Faktor der Gl. 5-1 hinzugefügt werden. Der Wichtungsfaktor ermöglicht es, die Sicherheitsvorteile von Um- und Ausbaumaßnahmen gegenüber den finanziellen Mehraufwendungen zu berücksichtigen. Zudem gliedert er sich in die bestehende Struktur der Bewertung von Maßnahmen in PMS ein.

Der Wertebereich des Wichtungsfaktors orientiert sich an den Grenzen von HOLLATZ (2013) und SCHMIDT (2013) für ihren Faktor  $F_{DTV}$ . Vergleichsrechnungen mittels PMS zur Festlegung sinnvoller Größen des Faktors  $F_{SIPO}$  bestehen noch nicht. Dieser sollte daher anhand realer PMS-Rechnungen validiert und ggf. auf Grundlage dieser Ergebnisse bzw. weiterer Anforderungen angepasst werden.

Tab. 5-10: Wichtungsfaktor für Um- und Ausbaumaßnahmen

Priorität gemäß EBERSBACH/SCHÜLLER (2007)	hoch	mittel	niedrig	kein SIPO
Wichtungsfaktor $F_{SIPO}$	2,0	1,5	1,2	1,0

Der Nutzen einer Maßnahme in Pavement-Management-Systemen kann somit über folgende Formel bestimmt werden.

$$N_j = \sum_{t=1}^n \Delta F_k * L_j * DTV_j * (1 + t_m * c) * (1 + p)^{-t_m} * F_{SIPO,j} \quad \text{Gl. 5-5}$$

$N_j$	[-]	Nutzen des j-ten Abschnitts
$\Delta F_k$	[-]	Flächendifferenz der Verhaltenskurven mit einer Maßnahmeart k und ohne Maßnahme („Nichts-tun“)
$L_j$	[-]	Länge des j-ten Abschnitts
$DTV_j$	[KFZ/24 h]	durchschnittlicher täglicher Verkehr des j-ten Abschnitts
$t_m$	[a]	Jahr der Maßnahme
$c$	[-]	Zuwachsfaktor für den DTV
$p$	[-]	(inflationsbereinigte) Diskontrate
$F_{SIPO,j}$	[-]	sicherheitstechnischer Wichtungsfaktor des j-ten Abschnitts

### 5.3 Berücksichtigung von entwurfs- und sicherheitstechnischen Aspekten bei PMS - Verfahrensablauf

Das Verfahren zur Berücksichtigung von entwurfs- und sicherheitstechnischen Aspekten bei PMS lässt sich in vier allgemeine Arbeitsschritte zusammenfassen:

- I Datengrundlage,
- II Bewertung der Straßengeometrie,
- III Ableitung zulässiger Erhaltungsmaßnahmen für PMS und
- IV Um- und Ausbaumaßnahmen in PMS.

Das entwickelte Verfahren erfordert eine netzweite und qualitativ hochwertige Datengrundlage. Es ist insbesondere die Güte/Qualität der Datenart DA 106 aus den Straßendatenbanken für das jeweilige Straßennetz zu prüfen (vgl. Ziffer 3.3.1). Die Daten sind ggf. neu zu erheben und zu berechnen (vgl. Ziffer 3.3.2). In der Verfahrensübersicht sind lediglich die zum bisherigen Stand des PMS zusätzlich erforderlichen Daten dargestellt.

Die Bewertung der Straßengeometrie erfolgt ausschließlich anhand der Linienführung im Lageplan in vier Stufen. In den Stufen eins bis drei werden für die einzelne Kurve die Anforderungen definiert sowie das Maß der Abweichung berechnet und klassifiziert. In der vierten Stufe wird die Linienführung des gesamten Straßenabschnitts bewertet.

Die in den Pavement-Management-Systemen implementierten Anwendungsbereiche ermöglichen es, nicht sinnvolle oder technisch nicht mögliche Maßnahmen auszublenken. Sie sind um die Aspekte der Linienführung im Lageplan zu erweitern.

Zuletzt ist ein Modul zur Auswahl und Bewertung von Um- und Ausbaumaßnahmen zu entwickeln. Dazu ist zunächst eine neue Budgetkategorie "Um- und Ausbau" einzuführen. In Abhängigkeit von den Defiziten der Linienführung im Lageplan sind entsprechende entwurfstechnische Maßnahmen vorzusehen. Die damit verbundenen Mehraufwendungen sind schließlich bei der Berechnung des Nutzens über den Wichtungsfaktor  $F_{SIP0}$  zu "würdigen".

I Datengrundlage

**Daten des Lageplans - Datenart DA 106 der TTSIB** mit den Attributen: VNK, NNK, VST, BST, ART, AUSRICHT, RADIUS, STOSSRAD

**Unfalldaten** (z. B. aus EUSka) mit Bezug zum Straßennetz, erforderliche Attribute: VNK, NNK, nk\_station, Unfallkategorie

## 1) Definition der Anforderungen

### Elementrelation R - R

Für aufeinanderfolgende Kurvenradien sind nur bestimmte Verhältnisse zulässig (auch bei Zwischengeraden von  $L_G \leq 300$  m). Zulässige Verhältnisse sind in den RAL - Bild 12 (FGSV 2012a) dargestellt. Als Abgrenzung dient der Übergang vom guten zum brauchbaren Bereich. Die erforderlichen Radien  $R_2$  können in Abhängigkeit von den in Fahrtrichtung davorliegenden Kurvenradien  $R_1$  über folgende mathematische Funktionen angenähert und richtungsgetreunt (also für beide Fahrtrichtungen) bestimmt werden.

Radienbereich $R_1$ [m]	Formel zur Berechnung von $R_2$
$R_1 \leq 200$	$R_2 = 0,75 * R_1$
$200 < R_1 < 270$	$R_2 = \sqrt{(936m)^2 - (R_1 - 699m)^2} - 642m$
$270 \leq R_1 \leq 620$	$R_2 = 0,5 * R_1 + 55m$
$620 < R_1 < 1500$	$R_2 = \sqrt{(2402,5m)^2 - (R_1 - 1417m)^2} - 1901m$
$R_1 \geq 1500$	$R_2 = 500m$

### Elementrelation G - R

Im Anschluss an Geraden sind Mindestradien gemäß RAL - Bild 13 (FGSV 2012a) zu gewährleisten. Als Abgrenzung dient ebenfalls der Übergang vom guten zum brauchbaren Bereich. Die erforderlichen Radien  $R$  können in Abhängigkeit von der Länge der Geraden  $L_G$  über folgende mathematischen Funktionen beschrieben und richtungsgetreunt (also für beide Fahrtrichtungen) bestimmt werden.

Länge der Geraden $L_G$ [m]	Formel zur Berechnung von $R_G$
$L_G < 300$	$R_G = 1,5 * L_G$
$L_G \geq 300$	$R_G = 450m$

### Mindestradius

Der für dieses Verfahren zugrundeliegende Mindestradius hängt von der Entwurfsklasse ab.

Entwurfsklasse (EKL)	Mindestradius $R_{min}$
EKL 1	$R_{min} = 350m$
EKL 2 bis EKL 4	$R_{min} = 125m$

**2) Berechnung des Maßes der Abweichung (Abw)****Elementrelation R - R**

$$Abw_{R-R} = 1 - \frac{R_{vorh}}{R_{erf}} = 1 - \frac{R_{vorh}}{R_2}$$

**Elementrelation G - R**

$$Abw_{G-R} = 1 - \frac{R_{vorh}}{R_{erf}} = 1 - \frac{R_{vorh}}{R_G}$$

Das Maß der Abweichung ( $Abw_{R-R}$  und  $Abw_{G-R}$ ) ist jeweils für beide Fahrrichtungen zu berechnen.

**3) Klassifizierung der Abweichungen**

Bewertung (Bew)	Bew <sub>R-R</sub> Abw <sub>R-R</sub> [%]	Bew <sub>G-R</sub> Abw <sub>G-R</sub> [%]	Bew <sub>minR</sub> R [m]
keine Abw. [0]	$Abw_{R-R} = 0$	$Abw_{G-R} = 0$	$R_{vorh} \geq R_{min}$
geringe Abw. [1]	$0 < Abw_{R-R} \leq 25$	$0 < Abw_{G-R} \leq 25$	$R_{vorh} \geq R_{min}$
hohe Abw. [2]	$Abw_{R-R} > 25$	$Abw_{G-R} > 25$	$R_{vorh} < R_{min}$

Es liegen nun fünf einzelne Bewertungen (Bew<sub>R-R/G-R</sub> jeweils Hin- und Rückrichtung sowie Bew<sub>minR</sub>) vor. Die schlechteste Einzelbewertung (also die größte Abweichung) wird dem Kurvenradius als maßgebende Bewertung zugewiesen.

$$Bew = \max(Bew_{R-R.hin}, Bew_{R-R.rück}, Bew_{G-R.hin}, Bew_{G-R.rück}, Bew_{minR})$$

**4) Linienführung des Straßenabschnitts**

Ermittlung des prozentualen Längenanteils an Kurvenbereichen mit hohen Abweichungen auf dem jeweiligen Straßenabschnitt

$$L_{Anteil} = \frac{\sum_{i=1}^n L_{i,Bew=2}}{L_{ges}}$$

$L_{Anteil}$	[%]	Längenanteil an Kurvenbereichen mit hohen Abweichungen
$L_{i,Bew=2}$	[m]	Länge einer Kurve mit hohen Abweichungen
$L_{ges}$	[m]	Länge des Straßenabschnitts

III Ableitung zulässiger Erhaltungsmaßnahmen für PMS

**Gruppierung von PMS-Maßnahmen**

Gruppierung der nach den PMS möglichen Erhaltungsmaßnahmen hinsichtlich ihres Umfangs in Maßnahmen der Instandsetzung (I1 und I2) und der Erneuerung (E1 und E2) gemäß Tab. 5-6

**Definition zusätzlicher Anwendungsbereiche für bauliche Erhaltungsmaßnahmen der Kategorien I2, E1 und E2**

Linienführung	Längenanteil an Kurvenbereichen mit hohen Abweichungen		
	$L_{\text{Anteil}} = 0 \%$	$0 < L_{\text{Anteil}} \leq 25 \%$	$L_{\text{Anteil}} > 25 \%$
zulässige Erhaltungsmaßnahmen	keine Beschränkung	I1, I2* und E1* zulässig, E2 verboten	I1 und I2* zulässig, E1 und E2 verboten

\* ergänzende Maßnahmen prüfen

**Festlegung ergänzender Maßnahmen**

Für die mit \* gekennzeichneten Erhaltungsmaßnahmen ist die Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit als ergänzende Maßnahme zu prüfen und ggf. vorzusehen. Um die Akzeptanz der Verkehrsteilnehmer für Geschwindigkeitsbeschränkungen zu erhöhen, ist es zweckmäßig, Grund und Länge der Begrenzung anzugeben.

IV Um- und Ausbaumaßnahmen in PMS

**neue Budgetkategorie**

Einführung der Budgetkategorie „Um- und Ausbau“

**Spezifizierung von Empfehlungen für Um- und Ausbaumaßnahmen**

Linienführung	Längenanteil an Kurvenbereichen mit hohen Abweichungen		
	$L_{\text{Anteil}} = 0 \%$	$0 < L_{\text{Anteil}} \leq 25 \%$	$L_{\text{Anteil}} > 25 \%$
Um-/Ausbauempfehlung	keine entwurfstechnische Maßnahme	elementweise Anpassung der Linienführung (Kurvenbegradigung)	Anpassung der Linienführung auf dem gesamten Straßenabschnitt

**Erweiterung der Nutzendefinition für Um- und Ausbaumaßnahmen**

- Berechnung der vorhandenen Unfallkosten (UK) (Unfallkostensätze gemäß Anhang C - Tab. C-1)

$$UK = \sum_{i=1}^n n_i * KS_i$$

$n_i$  [-] Unfallanzahl differenziert nach der Unfallkategorie  
 $KS_i$  [€] Kostensatz der entsprechenden Unfallkategorie

- Berechnung der vorhandenen Unfallkostendichte (UKD)

$$UKD = UK / (1000 * L * t)$$

L [km] Länge des Straßenabschnitts  
t [a] Betrachtungszeitraum

- Berechnung der Grundunfallkostendichte (gUKD)

$$gUKD = gUKR * DTV * 365 / 10^6$$

gUKR [€/ (1000 Kfz \* km)] Grundunfallkostenrate  
DTV [Kfz / 24 h] durchschnittlicher täglicher Verkehr

- Berechnung des Sicherheitspotenzials (SIPO)

$$SIPO = UKD - gUKD$$

- Berechnung der vermeidbaren Unfallkosten (vUK)

$$vUK = SIPO * L$$

- Gruppierung der Straßenabschnitte nach den vermeidbaren Unfallkosten in vier Klassen

Dazu sind die Straßenabschnitte absteigend nach der Höhe der vermeidbaren Unfallkosten zu reihen.

hohe Priorität:  $vUK \leq 20\%$  (die "obersten" 20 %)

mittlere Priorität:  $20\% < vUK \leq 60\%$  (die "mittleren" 40 %)

niedrige Priorität:  $60\% < vUK \leq 100\%$  (die "unteren" 40 %)

kein SIPO:  $vUK = 0$

- Ableitung des Wichtungsfaktors für Um- und Ausbaumaßnahmen

Priorität gemäß EBERSBACH/ SCHÜLLER (2007)	hoch	mittel	niedrig	kein SIPO
Wichtungsfaktor $F_{SIPO}$	2,0	1,5	1,2	1,0

- Berechnung des Nutzens (N)

$$N = \sum_{k=1}^n \Delta F_k * L * DTV * (1 + t_m * c) * (1 + p)^{-t_m} * F_{SIPO}$$

$\Delta F_k$  [-] Flächendifferenz der Verhaltenskurven mit einer Maßnahmeart k und ohne Maßnahme („Nichts-tun“)

L [-] Länge des Straßenabschnitts

DTV [KFZ/24 h] durchschnittlicher täglicher Verkehr

$t_m$  [a] Jahr der Maßnahme

c [-] Zuwachsfaktor für den DTV

p [-] (inflationsbereinigte) Diskontrate

$F_{SIPO}$  [-] sicherheitstechnischer Wichtungsfaktor



## 5.4 Abschätzung des Ausbaubedarfs von Straßennetzen - Verfahrensablauf

Die Straßenbaulastträger bzw. die Straßenbauverwaltungen verfolgen das Ziel, ihr Straßennetz sukzessive an den Stand der Technik anzupassen. Dabei sind zu den sicherheitstechnischen Aspekten auch strategische Überlegungen, wie die Übertragung des Prinzips der RAL (FGSV 2012a) nach Standardisierung und Wiedererkennbarkeit auf das bestehende Straßennetz, von besonderer Bedeutung. Der Ausbaubedarf wird daher anhand der Entwurfsebenen „Linienführung“ und „Querschnittsgestaltung“ abgeschätzt.

Das entwickelte Verfahren zur Abschätzung des Ausbaubedarfs von Straßennetzen lässt sich in vier allgemeine Arbeitsschritte zusammenfassen:

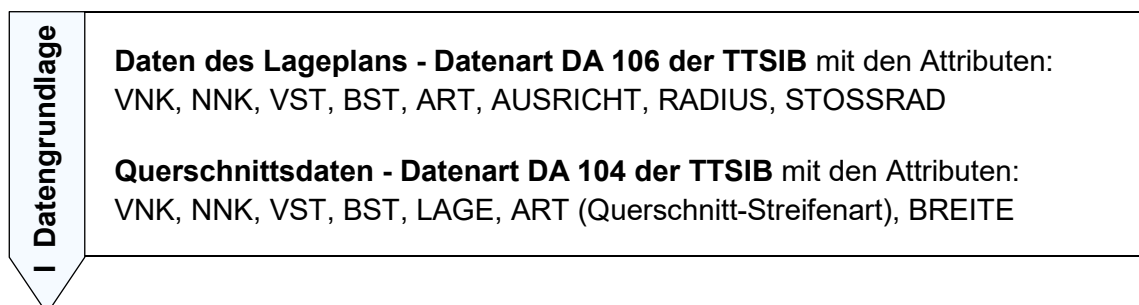
- I** Datengrundlage,
- II** Bewertung der Linienführung im Lageplan,
- III** Bewertung der Querschnittsgestaltung und
- IV** Um- und Ausbaumaßnahmen.

Das Verfahren zur Abschätzung des Ausbaubedarfs von Straßennetzen erfordert eine netzweite und qualitativ hochwertige Datengrundlage. Dabei ist insbesondere die Güte/Qualität der Datenart DA 106 aus den Straßendatenbanken für das jeweilige Straßennetz zu prüfen (vgl. Ziffer 3.3.1). Die Daten sind ggf. neu zu erheben und zu berechnen (vgl. Ziffer 3.3.2).

Die Bewertung der Linienführung im Lageplan erfolgt in vier Stufen. In den Stufen eins bis drei werden für die einzelne Kurve die Anforderungen definiert sowie das Maß der Abweichung berechnet und klassifiziert. In der vierten Stufe wird die Linienführung des gesamten Straßenabschnitts bewertet.

Der Querschnitt wird anhand der Breite der befestigten Fläche (als gewichtetes Mittel) bewertet und klassifiziert. Bankette sind nicht Bestandteil der Bewertung.

Die entwurfstechnischen Um- und Ausbauempfehlungen ergeben sich aus der Überlagerung der jeweiligen Bewertungen aus den Entwurfsebenen „Linienführung“ und „Querschnittsgestaltung“.



## 1) Definition der Anforderungen

### Elementrelation R - R

Für aufeinanderfolgende Kurvenradien sind nur bestimmte Verhältnisse zulässig (auch bei Zwischengeraden von  $L_G \leq 300$  m). Zulässige Verhältnisse sind in den RAL - Bild 12 (FGSV 2012a) dargestellt. Als Abgrenzung dient der Übergang vom guten zum brauchbaren Bereich. Die erforderlichen Radien  $R_2$  können in Abhängigkeit von den in Fahrtrichtung davorliegenden Kurvenradien  $R_1$  über folgende mathematische Funktionen angenähert und richtungsgetreunt (also für beide Fahrtrichtungen) bestimmt werden.

Radienbereich $R_1$ [m]	Formel zur Berechnung von $R_2$
$R_1 \leq 200$	$R_2 = 0,75 * R_1$
$200 < R_1 < 270$	$R_2 = \sqrt{(936m)^2 - (R_1 - 699m)^2} - 642m$
$270 \leq R_1 \leq 620$	$R_2 = 0,5 * R_1 + 55m$
$620 < R_1 < 1500$	$R_2 = \sqrt{(2402,5m)^2 - (R_1 - 1417m)^2} - 1901m$
$R_1 \geq 1500$	$R_2 = 500m$

### Elementrelation G - R

Im Anschluss an Geraden sind Mindestradien gemäß RAL - Bild 13 (FGSV 2012a) zu gewährleisten. Als Abgrenzung dient ebenfalls der Übergang vom guten zum brauchbaren Bereich. Die erforderlichen Radien  $R$  können in Abhängigkeit von der Länge der Geraden  $L_G$  über folgende mathematischen Funktionen beschrieben und richtungsgetreunt (also für beide Fahrtrichtungen) bestimmt werden.

Länge der Geraden $L_G$ [m]	Formel zur Berechnung von $R_G$
$L_G < 300$	$R_G = 1,5 * L_G$
$L_G \geq 300$	$R_G = 450m$

### Mindestradius

Der für dieses Verfahren zugrundeliegende Mindestradius hängt von der Entwurfsklasse ab. Differenziertere Festlegungen der Mindestradien sind möglich, jedoch aus Sicht der Verkehrssicherheit nicht erforderlich (vgl. Ziffer 5.1.2).

Entwurfsklasse (EKL)	Mindestradius $R_{min}$
EKL 1	$R_{min} = 350m$
EKL 2 bis EKL 4	$R_{min} = 125m$

## 2) Berechnung des Maßes der Abweichung (Abw)

### Elementrelation R - R

$$Abw_{R-R} = 1 - \frac{R_{vorh}}{R_{erf}} = 1 - \frac{R_{vorh}}{R_2}$$

### Elementrelation G - R

$$Abw_{G-R} = 1 - \frac{R_{vorh}}{R_{erf}} = 1 - \frac{R_{vorh}}{R_G}$$

Das Maß der Abweichung ( $Abw_{R-R}$  und  $Abw_{G-R}$ ) ist jeweils für beide Fahrtrichtungen zu berechnen.

## 3) Klassifizierung der Abweichungen

Bewertung (Bew)	$Bew_{R-R}$ $Abw_{R-R}$ [%]	$Bew_{G-R}$ $Abw_{G-R}$ [%]	$Bew_{minR}$ R [m]
keine Abw. [0]	$Abw_{R-R} = 0$	$Abw_{G-R} = 0$	$R_{vorh} \geq R_{min}$
geringe Abw. [1]	$0 < Abw_{R-R} \leq 25$	$0 < Abw_{G-R} \leq 25$	$R_{vorh} \geq R_{min}$
hohe Abw. [2]	$Abw_{R-R} > 25$	$Abw_{G-R} > 25$	$R_{vorh} < R_{min}$

Es liegen nun fünf einzelne Bewertungen ( $Bew_{R-R/G-R}$  jeweils Hin- und Rückrichtung sowie  $Bew_{minR}$ ) vor. Die schlechteste Einzelbewertung (also die größte Abweichung) wird dem Kurvenradius als maßgebende Bewertung zugewiesen.

$$Bew = \max(Bew_{R-R.hin}, Bew_{R-R.rück}, Bew_{G-R.hin}, Bew_{G-R.rück}, Bew_{minR})$$

## 4) Linienführung des Straßenabschnitts

Ermittlung des prozentualen Längenanteils an Kurvenbereichen mit hohen Abweichungen auf dem jeweiligen Straßenabschnitt

$$L_{Anteil} = \frac{\sum_{i=1}^n L_{i,Bew=2}}{L_{ges}}$$

$L_{Anteil}$	[%]	Längenanteil an Kurvenbereichen mit hohen Abweichungen
$L_{i,Bew=2}$	[m]	Länge einer Kurve mit hohen Abweichungen
$L_{ges}$	[m]	Länge des Straßenabschnitts

**III Bewertung der Querschnittsgestaltung**

**1) Berechnung der Fahrbahnbreite**

**Fahrbahnbreite als gewichtetes Mittel**

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n B_i * L_i}{\sum_{i=1}^n L_i}$$

B [m] Fahrbahn des Straßenabschnitts (als gewichtetes Mittel)  
 B<sub>i</sub> [m] Fahrbahnbreite des Teilbereichs  
 L<sub>i</sub> [m] Länge des Teilbereichs

**2) Klassifizierung der Abweichungen**

Bewertung (Bew)	EKL 1 B [m]	EKL 2 B [m]	EKL 3 B [m]	EKL 4 B [m]
keine Abw.	B ≥ 12,50	B ≥ 8,50	B ≥ 8,00	B ≥ 6,00
geringe Abw.	11,50 ≤ B < 12,50	7,50 ≤ B < 8,50	7,00 ≤ B < 8,00 (6,00 ≤ B < 8,00)	4,00 ≤ B < 6,00
hohe Abw.	B < 11,50	B < 7,50	B < 7,00 (B < 6,00)	B < 4,00

**Anmerkung:** Werte in Klammern bei DTV ≤ 4.000 Kfz/24 h

**IV Um- und Ausbauempfehlungen**

**Matrix zur Ableitung von Um- und Ausbauempfehlungen**

Querschnitt	Linienführung Längenanteil an Kurvenbereichen mit hoher Abweichung		
	L <sub>Anteil</sub> = 0 %	0 % < L <sub>Anteil</sub> ≤ 25 %	L <sub>Anteil</sub> > 25 %
keine/geringe Abweichung	keine bauliche Maßnahme	elementweise Anpassung der Linienführung	Anpassung der Linienführung
hohe Abweichung	Querschnittsverbreiterung	Querschnittsverbreiterung mit elementweiser Anpassung der Linienführung	Querschnittsverbreiterung mit Anpassung der Linienführung

Auf Grundlage dieser Empfehlungen können zudem anhand pauschaler Kostensätze die erforderlichen Ausbaukosten abgeschätzt werden. Der Bund beabsichtigt, im Zuge der Einführung der AKVS (2014) länder-spezifische Preistabellen bereitzustellen und zu pflegen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Pavement-Management-Systeme wurden in den letzten Jahren in mehreren Bundesländern (z. B. in Baden-Württemberg, Bayern, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Schleswig-Holstein und Thüringen) für die Abschätzung des Erhaltungsbedarfs bzw. für die Erstellung von Erhaltungsprogrammen eingesetzt (KRAUSE 2018). Sie haben sich als geeignetes Werkzeug für die strategische Erhaltungsplanung etabliert.

Pavement-Management-Systeme helfen, Art und Zeitpunkt von Erhaltungsmaßnahmen sinnvoll und objektiv auszuwählen. Die Auswahl der Maßnahmen erfolgt auf Grundlage einer Nutzwertanalyse (Nutzen-Kosten-Verhältnis bei vorgegebenem Zeitraum und Budget). Anwendungsbereiche ermöglichen es dabei, nicht sinnvolle bzw. technisch nicht mögliche Maßnahmen abzugrenzen. Der Nutzen von Erhaltungsmaßnahmen wird als qualitatives Maß über die Flächendifferenz zwischen den Verhaltenskurven abgeschätzt. Er beschränkt sich somit hauptsächlich auf die Verbesserung des Straßenzustands. Sicherheits- und entwurfstechnische Belange werden bei der Festlegung von Erhaltungsmaßnahmen in PMS derzeit noch nicht berücksichtigt.

Die Unfallstatistik verdeutlicht jedoch, dass diese Aspekte insbesondere auf Landstraßen im Zuge von Maßnahmen der baulichen Erhaltung auch beachtet werden sollten. Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, ein Verfahren zu entwickeln, welches die Geometrie eines Straßennetzes bewertet und - daraus abgeleitet - entsprechende Kriterien für die Integration in Pavement-Management-Systeme definiert. Um darauf aufbauend entwurfstechnische Um- und Ausbauempfehlungen wirksam in das PMS zu implementieren, war die derzeitige Nutzendefinition um sicherheitstechnische Aspekte weiterzuentwickeln.

Dazu waren zunächst die maßgebenden Entwurfsmerkmale abzugrenzen. In der Literatur wird mehreren Entwurfsmerkmalen ein Einfluss auf die Verkehrssicherheit zugesprochen. In der vorliegenden Arbeit haben sich vor allem die Fahrbahnbreite und die Größe/Abfolge der Lageplanelemente als sicherheitsrelevant herausgestellt. Fahrbahnbreiten von  $7,00 \text{ m} \leq B \leq 8,50 \text{ m}$  sind - ähnlich wie bei VIETEN U. A. (2010) - durch ein geringeres Unfallgeschehen gekennzeichnet. Dieser Sicherheitsvorteil breiterer Querschnitte wurde insbesondere bei nicht relationstrassierten Streckenabschnitten festgestellt. Es zeigte sich jedoch, dass die Belange der Linienführung im Lageplan stärker auf die Verkehrssicherheit wirken als die Querschnittsgestaltung. Relationstrassierte Strecken wiesen unabhängig von der Fahrbahnbreite durchschnittlich nur halb so hohe Unfallkennwerte auf wie nicht relationstrassierte Straßenabschnitte. Zur Bewertung der Relationstrassierung hat sich das Maß der Abweichung von den Forderungen der RAL (FGSV 2012a) als geeignetes Kriterium herausgestellt. Bei einer prozentualen Abweichung von  $Abw > 25 \%$  stiegen in den vorliegenden Streckenkollektiven die Unfallkennwerte sprunghaft an.

Anhand dieser Ergebnisse wurden Verfahren zur entwurfstechnischen Bewertung von Straßennetzen erarbeitet. Die Verfahren basieren auf einem dreistufigen Bewertungssystem, welches das Maß der Abweichung von den Entwurfsrichtlinien beschreibt. Dem Verfahren zur Berücksichtigung entwurfstechnischer Aspekte beim Pavement-Management liegen ausschließlich die Belange der Linienführung im Lageplan zu Grunde, da diese nachweislich einen größeren Einfluss auf die Verkehrssicherheit von Landstraßen im Bestand haben. Im Ergebnis werden allgemeine Empfehlungen zur

Anpassung der Linienführung in Abhängigkeit vom Längenanteil sicherheitskritischer Kurven an der Gesamtlänge des Straßenabschnitts formuliert.

Zur Abschätzung des Ausbaubedarfs von Straßennetzen kann das Verfahren um die Entwurfsebene „Querschnittsgestaltung“ erweitert werden. Die Defizite der räumlichen Linienführung (verdeckte Kurvenbeginne und kritische Sichtschattenbereiche) haben sich bei der netzweiten Analyse nicht als vordringliche Sicherheitskriterien herausgestellt. Es gab nur vereinzelte Bereiche, die unfallauffällig waren. Diese sollten eher im Rahmen der örtlichen Unfallkommission untersucht werden.

Die Empfehlungen für entwurfstechnische Maßnahmen können über die eingangs erwähnten Anwendungsbereiche bei der strategischen Erhaltungsplanung mittels PMS berücksichtigt werden. In Abhängigkeit vom Längenanteil sicherheitskritischer Kurvenbereiche sind nur bestimmte Erhaltungsmaßnahmen zulässig. Damit können höherwertige (und somit geschwindigkeitserhöhende) Maßnahmen der baulichen Erhaltung bei Straßenabschnitten mit unzureichender geometrischer Gestaltung ausgeschlossen bzw. abgegrenzt werden.

Diese Bereiche sind in der Linienführung elementweise bzw. gänzlich anzupassen. Entsprechende Um- und Ausbaumaßnahmen waren daher im letzten Schritt wirksam in das PMS zu integrieren. Den i. A. höheren Kosten dieser Maßnahmen steht der zu erwartende volkswirtschaftliche „Gewinn“ infolge vermiedener Straßenverkehrsunfälle gegenüber. Daher wurde die Definition des Nutzens bei Um- und Ausbaumaßnahmen um den Wichtungsfaktor  $F_{SIP0}$  erweitert, welcher das tatsächliche Unfallgeschehen der jeweiligen Straßenabschnitte berücksichtigt. Der vorgeschlagene Wertebereich des Wichtungsfaktors  $F_{SIP0}$  sollte allerdings anhand realer PMS-Rechnungen validiert und ggf. angepasst werden. Entsprechende PMS-Vergleichsrechnungen bestehen derzeit noch nicht.

Mit dem vorgestellten Verfahren können bei der strategischen Erhaltungsplanung nun entwurfstechnische Belange ebenfalls berücksichtigt werden. Die aus den Sicherheitsuntersuchungen abgeleiteten Parameter und Kriterien orientieren sich an der Grundstruktur der Straßendatenbanken. Damit ist es möglich, bestehende PMS-Module anzupassen sowie ein eigenständiges Modul „Um- und Ausbau“ zu entwickeln und in das Gesamtsystem zu implementieren. Die erforderliche Datengrundlage ist zum Teil bereits in den Straßendatenbanken vorhanden bzw. kann mit vertretbarem Aufwand berechnet werden. Bei konsequenter Anwendung des Verfahrens wird sich die Sicherheit auf Landstraßen mittel- und langfristig verbessern. Voraussetzung dafür ist das Zusammenwirken der betreffenden Referate in den Straßenbauverwaltungen bei der Finanzierungsgrundlage, da sich Erhaltung und Um- und Ausbau aus verschiedenen Titeln finanzieren.

Damit die Belange der aktiven Verkehrssicherheit dauerhaft stärker bei der strategischen Erhaltungsplanung berücksichtigt werden, sollte das vorgestellte Verfahren sinngemäß in den Regelwerken der FGSV, im Speziellen in den RPE-Stra 01 (FGSV 2001a), verankert werden.

## Literaturverzeichnis

- Adami, C. (2017): *Detaillierte Sicherheitsuntersuchungen an Streckenabschnitten mit Sichtschattenbereichen*. Projektarbeit, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Al-Kassar, B.; Hoffmann, G.; Zmeck, D. (1981): *Der Einfluß der Streckenmerkmale auf die Momentangeswindigkeit freifahrender Pkw*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 323, Bonn - Bad Godesberg.
- Appelt, V. (1998): *Sichtbare Radien als ein Kriterium zur Beurteilung der räumlichen Linienführung von einbahnigen Außerortsstraßen*. Dissertation, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- ASTA (2014): *Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A5.2 Straßenbaustellen - Anforderungen an Arbeitsplätze und Verkehrswege auf Baustellen im Grenzbereich zum Straßenverkehr*. Entwurf, Ausschuss für Arbeitsstätten, Berlin.
- Bakaba, J.-E. (2001): *Ableitung vereinfachter Modellansätze zur Geschwindigkeitsprognose auf Außerortsstraßen auf der Grundlage der verfügbaren Variablen aus der Straßendatenbank*. Dissertation, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Bark, A.; Chales-de Beaulieu, C.; Lippold, C.; Heine, A.; Veters, A.; Zösch, J. (2015): *Empfehlungen zur Vermeidung von Zusammenstößen mit dem Gegenverkehr auf Landstraßen*. Schlussbericht, Forschungsvorhaben FE 03.475/2011/ARB des BMVI, Gießen.
- Berger, R. (2016): *Modelle zur Bewertung der Verkehrssicherheit von Landstraßen*. Dissertation, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Bitzl, F. (1964): *Der Sicherheitsgrad von Straßen*. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 28, Bonn.
- Bitzl, F. (1967): *Der Einfluß der Straßeneigenschaften auf die Verkehrssicherheit*. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 55, Bonn.
- BMV (1995): *Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA)*. Bundesministerium für Verkehr, Bonn.
- BMVBS (2009): *Anweisung Straßeninformationsbank (ASB) - Teilsystem Bestandsdaten*. Projektgruppe "ASB" der Dienstbesprechung "IT-Koordinierung im Straßenwesen", Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin.
- BMVBW (2001): *Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 31/2001*. Sachgebiet 04.6: Straßenbefestigungen, Straßenerhaltung, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen, Bonn.

- Boden, R. (2000): *Erarbeitung eines allgemeinen Schemas zur Einteilung von Straßen der Kategorie A hinsichtlich ihrer räumlichen Linienführung*. Diplomarbeit, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Böhm, P. M. (1997): *Entwurfsbezogenes Bewertungsverfahren für den verkehrssicheren Einfachausbau von Straßen*. Dissertation, Fachbereich Wasser und Verkehr der Technischen Hochschule Darmstadt, Darmstadt.
- Bösl, B.; Spahn, V. (2010): *Präventiver Schutz vor schweren Unfallfolgen auf Landstraßen*. Straßenverkehrstechnik, Heft 2/2010, Bonn.
- Brannolte, U.; Barth, H. B.; Schwarzmann, R.; Junkers, W.; Liu, Y.; Sigthorsson, H.; Stein, J. (1993): *Sicherheitsbewertung von Querschnitten außerörtlicher Straßen*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik Heft V5, Bergisch Gladbach.
- Bräuninger, S. (2007): *Einfluss von ausgewählten Zustandsmerkmalen und Geometrieparametern auf das Unfallgeschehen*. Diplomarbeit, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Buck, M. (1992): *Geschwindigkeitsverhalten auf einbahnigen Außerortsstraßen in Abhängigkeit von baulichen, betrieblichen und verkehrlichen Randbedingungen*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 621, Bonn - Bad Godesberg.
- Butterwegge, P. (2001): *Einfluss von Oberflächennässe auf das Entstehen von Unfallhäufungen (schwerer Unfälle) in einem ausgewählten Außerortsstraßennetz (Bundes- und Landesstraßen) des Oberbergischen Kreises (NRW)*. Diplomarbeit, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- DESTATIS (2016): *Verkehrsunfälle - Zeitreihen*. Wiesbaden.
- DESTATIS (2017): *Verkehr - Verkehrsunfälle*. Wiesbaden.
- Dietrich, K.; Spacek, P. (1977): *Sicherheit im Straßenverkehr*. Institut für Verkehrsplanung und Transporttechnik - Unterlage zur Vorlesung, Zürich.
- Dietze, M.; Ebersbach, D.; Lippold, C.; Mallschütze, K.; Gatti, G.; Wieczniensky, A. (2008): *Safety Performance Function*. Schlussbericht zum RIPCORD-ISEREST-Projekt, URL: <http://ripcord.bast.de> (05.06.2008).
- Dilling, J. (1973): *Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen auf kurvigen Strecken*. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 151, Bonn.
- Durth, W.; Biedermann, B.; Vieth, B. (1983): *Einflüsse der Erhöhung von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen von Fahrzeugen auf die Entwurfsgeschwindigkeit*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 385, Bonn - Bad Godesberg.
- Ebersbach, D. (2006): *Entwurfstechnische Grundlagen für ein Fahrerassistenzsystem zur Unterstützung des Fahrers bei der Wahl seiner Geschwindigkeit*. Dissertation, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.



- Ebersbach, D.; Schüller, H. (2007): *Praktische Anwendung der Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen (ESN): Erfahrungen, Möglichkeiten und Grenzen*. Dresden.
- Elsner (2018) *Der Elsner - Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen*  
Verlagsgesellschaft Otto Elsner.
- Engelke, H.-U. (1990): *Ableitung streckenspezifischer Parameter zur Bewertung der räumlichen Linienführung von Straßen*. Dissertation, Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“ Dresden, Dresden.
- FGSV (1956): *Richtlinien für die Anlage von Landstraßen, I. Teil: Querschnittsgestaltung (RAL-Q)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (1959): *Entwurf der Richtlinien für die Anlage von Landstraßen, II. Teil: Linienführung (RAL-L)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (1973): *Richtlinien für die Anlage von Landstraßen, Teil II: Linienführung (RAL-L), Abschnitt 1: Elemente der Linienführung (RAL-L-1)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (1974): *Richtlinien für die Anlage von Landstraßen, Teil I: Querschnitte (RAL-Q)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (1982): *Richtlinien für die Anlage von Landstraßen, Teil: Querschnitte (RAS-Q)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (1982): *Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Querschnitte (RAS-Q)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (1984): *Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Linienführung (RAS-L), Abschnitt 1: Elemente der Linienführung*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (1995): *Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Linienführung (RAS-L)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (1996): *Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Querschnitte (RAS-Q)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (1997): *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (2001a): *Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen (RPE-Stra 01)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (2001b): *Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 2001)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (2001c): *Merkblatt für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen, Teil 2: Maßnahmen gegen Unfallhäufungen*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

- FGSV (2003a): *Merkblatt für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen, Teil 1: Führen und Auswerten von Unfalltypensteckkarten*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (2003b): *Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen (ESN)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (2006): *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und –bewertung von Straßen (ZTV ZEB-StB 06)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (2008a): *Hinweise zur Visualisierung von Entwürfen für außerörtliche Straßen (H ViSt)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (2008b): *Richtlinien für die integrierte Netzgestaltung (RIN)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (2009): *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen in Asphaltbauweisen (ZTV BEA-StB)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (2012a): *Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (2012b): *Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 2012)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (2012c): *Merkblatt zur Örtlichen Untersuchung in Unfallkommissionen (M Uko)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (2015): *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (2015a): *Richtlinien für das Sicherheitsaudit von Straßen (RSAS, Entwurf 09/2015)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV (2018): *Merkblatt zur Übertragung des Prinzips der Entwurfsklassen auf bestehende Straßen (M EKLBest, Entwurf 03/2018)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- Friedrich, B.; Dammann, W.; Irzik, M. (2005): *Ausbaustandard und Überholverhalten auf 2+1-Strecken*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen; Verkehrstechnik Heft V131, Bergisch Gladbach.
- GDV (2002): *Auswertung von Straßenverkehrsunfällen, Teil 2: Maßnahmen gegen Unfallhäufungen*. Sicherung des Verkehrs auf Straßen -SVS-, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., Berlin.
- GDV (2003): *Auswertung von Straßenverkehrsunfällen, Teil 1: Führen und Auswerten von Unfalltypensteckkarten*. Sicherung des Verkehrs auf Straßen - SVS-, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., Berlin.
- Geigenmüller, U. (1996): *Untersuchung des Fahrverhaltens von Kraftfahrern auf Außerortsstraßen in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Streckencharakteristik*. Diplomarbeit, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.

- Hegewald, A.; Weber, A. (2008): *Unfälle auf schmalen Landstraßenquerschnitten*. Straßenverkehrstechnik, Heft 11/2008, Bonn.
- Heller, S.; Bühler, B.; Jeuthe, U. (1997): *Weiterentwicklung von Untersuchungsansätzen zur Optimierung der objektbezogenen Erhaltungsplanung in Teilnetzen unter Berücksichtigung finanzieller Restriktionen*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 739, Bonn - Bad Godesberg.
- Hiersche, E.-U.; Lamm, R.; Dieterle, K.; Nikpour, A. (1984): *Auswirkungen von Ausbaumaßnahmen gemäß den RAL-L auf die Verkehrssicherheit zweispuriger Straßen*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 431, Bonn - Bad Godesberg.
- Hinsch, K.; Maerschalk, G.; Pingel, C. (1990): *Untersuchungen zur Häufigkeitsverteilung von Erhaltungsmaßnahmen und Erhaltungsintervallen aufgrund von Netzanalysen zur Fortschreibung der Bedarfsermittlung für Bundesfernstrassen*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 584, Bonn - Bad Godesberg.
- Hollatz, A. (2013): *Einführung eines Prozesses zur koordinierten Erhaltungsplanung auf Basis von ZEB- und Planungsdaten*. Erfahrungsaustausch Koordiniertes Erhaltungs- und Bauprogramm - Heller Ingenieurgesellschaft mbH, 23.-24. April 2013, Darmstadt.
- Iffert, P. (2013): *Welligkeit als Indikator für Sichtschattenbereiche?*. Studienarbeit, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Irzik, M. (2010): *Überholverhalten auf 2+1-Strecken - Ein Beitrag zur Gestaltung von dreistreifigen Landstraßen*. Straßenverkehrstechnik, Heft 2/2010, Bonn.
- Jackwitz, D. (1996): *Untersuchung des Fahrverhaltens in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Sichtweite*. Diplomarbeit, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Jährig, T. (2012): *Wirksamkeit von Maßnahmen zur Verbesserung der Verkehrssicherheit auf einbahnigen Landstraßen*. Dissertation, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Knoflacher, H. (1980): *Geschwindigkeitsverhalten und Unfallgeschehen in Abhängigkeit von den Ausbauelementen*. Straßenverkehrstechnik, Heft 4/1980, Bonn.
- Knoflacher, H.; Pfleger, E.; Schwarzbauer, F. (1979): *Anteil baulicher Unfallursachen am Unfallgeschehen*. Kuratorium für Verkehrssicherheit, Kleine Fachbuchreihe, Band 15, Wien.
- Köppel, G.; Bock, H. (1970): *Kurvigkeit, Stetigkeit und Fahrgeschwindigkeit*. Straße und Autobahn, Heft 8/1970, Bonn - Bad Godesberg.
- Köppel, G.; Bock, H. (1979): *Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Kurvigkeit*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 269, Bonn - Bad Godesberg.

- Kotsch, S. (2012): *Analyse der räumlichen Linienführung am Beispiel des Grundnetzes von Brandenburg*. Diplomarbeit, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Krause, G. (2000): *Abgrenzung von Mängelklassen zur Kennzeichnung von Schadensursachen mit Hilfe messtechnisch erfasster Bestands- und Zustandsmerkmale*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 790, Bonn.
- Krause, G. (2001): *Systematische Straßenerhaltung und Pavement-Management-System*. SEP Maerschalk 2001, URL: [http://www.sep-maerschalk.de/cms/files/Vorlesung\\_PMS\\_Teil1.pdf](http://www.sep-maerschalk.de/cms/files/Vorlesung_PMS_Teil1.pdf) (30.01.2013) und [http://www.sep-maerschalk.de/cms/files/Vorlesung\\_PMS\\_Teil2.pdf](http://www.sep-maerschalk.de/cms/files/Vorlesung_PMS_Teil2.pdf) (30.01.2013).
- Krause, G. (2018): *telefonisches Fachgespräch am 09.05.2018 zwischen Herrn Günter Krause und Herrn Andreas Heine*.
- Krause, G.; Maerschalk, G. (2010): *Auswertung von Forschungsarbeiten zur Weiterentwicklung des Pavement Management Systems (PMS)*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1037, Bonn.
- Krebs, H. (1970): *Fahrdynamik und Sicherheit*. Straße und Autobahn, Heft 2/1970, Bonn - Bad Godesberg.
- Krebs, H. G. (1973): *Einfluß des Kurvenschneidens auf Bogengeschwindigkeit und Trassierungsgrundsätze*. Straße und Autobahn, Heft 8/1973, Bonn - Bad Godesberg.
- Krebs, H. G.; Glöckner, H. (1977): *Untersuchungen über Unfallraten in Abhängigkeit von Straßen- und Verkehrsbedingungen außerhalb geschlossener Ortschaften*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 223, Bonn - Bad Godesberg.
- Krebs, H.; Damianoff, N. (1983): *Geschwindigkeitsverhalten bei Gefahrenzeichen, in Kurven und an Stellen mit Geschwindigkeitsbeschränkungen*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 380, Bonn - Bad Godesberg.
- Kupke, P. (1977): *Simulatorexperimente zum trassenabhängigen Fahrverhalten und Überprüfen der Linienführung*. Dissertation, Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- Labs, U. (1986): *Eignung, Erfassung und Auswahl psychophysiologischer Funktionsgrößen zur Ermittlung der Belastung von Kraftfahrern in Abhängigkeit von den Elementen der Straßenverkehrsanlage*. Dissertation, Fakultät für Technik und Naturwissenschaften der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List", Dresden.
- Lamm, R.; Beck, A.; Zumkeller, K. (1999): *Analyse von Zusammenhängen zwischen Verkehrssicherheit und Straßenentwurf auf Außerortsstraßen*. Straßen- und Tiefbau, Heft 12, Hannover.
- Lamm, R.; Steffen, H.; Günther, A. K. (1992): *Sicherheitsüberprüfung im Straßenentwurf unter Anwendung komplexer EDV-Systeme*. Straßen- und Tiefbau, Heft 10/1992, Isernhagen.

- Lehmann, T.; Heine, A. (2010): - *Kategorisierung der Kreisstraßen im Landkreis Mittelsachsen - Geometrische Aufnahme und entwurfstechnische Bewertung als Grundlage für die Erstellung eines Bauprogramms*. Dresden.
- Lerch, T.; Hammerschmidt, A.; Heine, A.; Patzak, J. (2014): *Erhaltungsstrategie für Staatsstraßen im Freistaat Sachsen*. Schlussbericht, LISt Gesellschaft für Verkehrswesen und ingenieurtechnische Dienstleistungen mbH, Rochlitz.
- Leutner, R. (1974): *Fahrraum und Fahrverhalten*. Dissertation, Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- Leutzbach, W.; Zoellmer, J. (1989): *Zusammenhang zwischen der Verkehrssicherheit und den Elementen des Straßenentwurfs*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 545, Bonn - Bad Godesberg.
- Levin, C. (1991): *Differenzierte Kuppenbemessung*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 600, Bonn - Bad Godesberg.
- Linke, O. (2016): *Detaillierte Sicherheitsuntersuchungen an Streckenabschnitten mit verdeckten Kurvenbeginnen*. Diplomarbeit, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Lippold, C. (1997): *Weiterentwicklung ausgewählter Entwurfsgrundlagen von Landstraßen*. Dissertation, Fachbereich Wasser und Verkehr der Technischen Hochschule Darmstadt, Darmstadt.
- Lippold, C.; Enzfelder, K.; Bark, A.; Kutschera, R. (2013): *Wirkung, Akzeptanz und Dauerhaftigkeit von Elementen der Fahrtrichtungstrennung auf Landstraßen*. Schlussbericht, Forschungsvorhaben FE 02.281/2007/AGB des BMVBS, Dresden.
- Lippold, C.; Vettters, A.; Lehmann, T.; Ressel, W.; Klötzl, S. (2011c): *Entwurfstechnische Möglichkeiten zur Vermeidung entwässerungsschwacher Zonen auf Richtungsfahrbahnen*. Schlussbericht, Forschungsvorhaben FE 02.295/2008/AGB des BMVBS, Dresden.
- Lippold, C.; Vettters, A.; Ressel, W.; Alber, S. (2016): *Vergleich und Bewertung von baulichen Lösungen zur Vermeidung von abflussschwachen Zonen in Verwindungsbereichen*. Schlussbericht, Forschungsvorhaben FE 02.0321/2010 des BMVI, Dresden.
- Lippold, C.; Weise, G.; Jählig, T. (2011a): *Verbesserung der Verkehrssicherheit auf einbahnig zweistreifigen Außerortsstraßen (AOSI)*. unveröffentlichter Schlussbericht, Dresden.
- Lippold, C.; Weise, G.; Ebersbach, D.; Heine, A.; Gruner, A. (2011b): *Entwurfstechnische Bewertung des Grundnetzes im Land Brandenburg*. Schlussbericht, Dresden.
- Maerschalk, G. (1997): *Erstellung einer ablauffähigen Folge von Algorithmen für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen und der Mittelverwendung eines PMS*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 751, Bonn - Bad Godesberg.

- Maerschalk, G.; Krause, G. (2004): *Erstanwendung der vorliegenden Algorithmen für die Erhaltungsplanung in ausgewählten Bauämtern*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 878, Bonn.
- Maerschalk, G.; Socina, M. (2008): *Weiterentwicklung der Bewertung des Pavement Management Systems (PMS) um ein Verfahren für die Umsetzung von Qualitätszielen*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1001, Bonn.
- Maier, R.; Berger, R.; Schüller, H.; Heine, A. (2012): *Bewertungsmodell für die Verkehrssicherheit von Straßen*. Schlussbericht, Forschungsvorhaben FE 82.334/2007 des BMVBS, Dresden.
- Meewes, V.; Maier, R. (1984): *Modellversuch B33: „2+1“-spurige Landstraßen*. Mitteilungen der Beratungsstelle für Schadenverhütung, Nr. 22, Köln.
- Osterloh, H. (1983): *Mathematische Erfassung des räumlichen Eindrucks des Perspektivbildes auf den Kraftfahrer*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 394, Bonn - Bad Godesberg.
- Palm, I.; Schmidt, G. (1999): *Querschnittsbreiten einbahniger Außerortsstraßen und Verkehrssicherheit*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen; Verkehrstechnik Heft V64, Bergisch Gladbach.
- Palm, I.; Schmidt, G. (1999): *Sonderuntersuchung zum Querschnittstyp b2+1*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen; Verkehrstechnik, Heft V64, Bergisch Gladbach.
- Patzak, J. (2002): *Analyse des Fahrverhaltens von PKW auf Außerortsstraßen*. Diplomarbeit, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Ruhe, O. (2016): *Auswirkungen verkehrsrechtlicher und -technischer Maßnahmen auf das Unfallgeschehen sicherheitskritischer Kurvenbereiche*. Diplomarbeit, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Schlag, B.; Voigt, J.; Lippold, C.; Enzfelder, K. (2013): *Auswirkungen von Querschnittsgestaltung und längsgerichteten Markierungen auf das Fahrverhalten auf Landstraßen*. Schlussbericht, Forschungsvorhaben FE 82.335/2007 des BMVBS, Dresden.
- Schlichter, H. G. (1985): *Räumliche Linienführung von Verkehrswegen*. Habilitation, Institut für Straßenbau und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- Schmid, H. (2004): *Griffigkeiten im Straßennetz - Zustandsbewertung des Straßennetzes*. Diplomarbeit, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Schmidt, C. (2013): *Anforderungen des Landesbetriebes Straßenbau NRW an das Erhaltungsmanagement der Bundesfernstraßen*. Erfahrungsaustausch Koordiniertes Erhaltungs- und Bauprogramm - Heller Ingenieurgesellschaft mbH, 23.-24. April 2013, Darmstadt.

- Schmuck, A. (1993): *Kommunaler Straßenbau - Beiträge zum Bau- und Erhaltungsmanagement*. Informationen - Verkehrsplanung und Straßenwesen - der Universität der Bundeswehr München, Heft 35, München - Neubiberg.
- Schmuck, A.; Maerschalk, G. (1987): *Auswirkungen aufgeschobener Erhaltungsmaßnahmen auf den mittel- und langfristigen Finanzbedarf für die Straßenerhaltung*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 501, Bonn - Bad Godesberg.
- Schmuck, A.; Oefner, G.; Rezanka, S. (1986): *Strategiemodellverfahren zur Ermittlung des Finanzbedarfs für die Erhaltung des Straßenoberbaus*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 456, Bonn - Bad Godesberg.
- Schneider, J. (1986): *Ein Beitrag zur Bewertung der Linienführung von Landstraßen*. Dissertation, Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“ Dresden, Dresden.
- Schröder, G. (2013): *Erhaltung der Straßeninfrastruktur*. Vortrag zum Erfahrungsaustausch Koordiniertes Erhaltungs- und Bauprogramm in Darmstadt am 23. und 24. April 2013, Darmstadt.
- Schulz, R. (2002): *Grenzen und Möglichkeiten einer teilautomatisierten Nachtrassierung im Lageplan auf der Grundlage von Punktfolgen*. Studienarbeit, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Schulz, R. (2012): *Blickverhalten und Orientierung von Kraftfahrern auf Landstraßen*. Dissertation, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Seebo, D. (2011): *Ein Beitrag zur Entwicklung einer Methodik zur Analyse der Verkehrsqualität in größeren Netzen bei vertretbarem Aufwand*. Dissertation, Abteilung Bauingenieurwesen der Bergischen Universität Wuppertal, Wuppertal.
- Socina, M.; Komma, C. (2015): *Kennzahlen für die gesamtwirtschaftliche Bewertung von Erhaltungsstrategien*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1113, Bonn.
- Sossoumihen, A. J. (2001): *Entwicklung eines Rahmenkonzeptes zur Bewertung der Linienführung von Außerortsstraßen nach der Zielfunktion Fahrsicherheit*. Dissertation, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Spacek, P. (1999): *Spurverhalten und Unfallgeschehen in Kurvenbereichen*. Straßenverkehrstechnik, Heft 2/1999, Bonn.
- Steinauer, B.; Schuckließ, W. T. (2008): *Übergreifende Bewertung von Streckenabschnitten und Knotenpunkten auf Landstraßen*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1004, Bonn.
- Steyer, R. (2004): *Beitrag zur Erhöhung der Fahrsicherheit in Kurvenbereichen zweistreifiger Außerortsstraßen*. Dissertation, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Trapp, K.-H. (1971): *Untersuchungen über den Verkehrsablauf auf Landstraßen*. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 113, Bonn.

- Trapp, K.-H.; Oellers, F.-W. (1974): *Streckencharakteristik und Fahrverhalten auf zweispurigen Landstraßen*. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 176, Bonn.
- Vieten, M.; Dohmen, R.; Dürhager, U.; Legge, K. (2010): *Quantifizierung der Sicherheitswirkung verschiedener Bau, Gestaltungs- und Betriebsformen auf Landstraßen*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen; Verkehrstechnik Heft V201, Bergisch Gladbach.
- Weise, G. (1991): *Die Bewertung der Linienführung als Kriterium für die Vorbereitung von Erneuerungsmaßnahmen im Landstraßennetz*. Straße und Autobahn, Heft 9/1991, Bonn.
- Weise, G.; Steyer, R. (1999): *Gestaltungskriterien von Landstraßenkurven*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen; Verkehrstechnik Heft V63, Bergisch Gladbach.
- Weise, G.; Dietze, M.; Ebersbach, D.; Kuczora, V. (2002): *Entwicklung eines praktikablen Verfahrens zur Berücksichtigung der räumlichen Linienführung von Außerortsstraßen*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 849, Bonn.
- Wellner, F. (2015): *Straßenerhaltung - bautechnische Maßnahmen*. Vorlesungsunterlagen, Dresden.
- Wilke, S. (1996): *Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der gefahrenen Geschwindigkeit und ausgewählten Parametern der Linienführung unstetiger Außerortsstraßen*. Diplomarbeit, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Wolf, W.; Berger, R.; Bärwolff, M. (2018): *Unterstützung der Unfallkommissionsarbeit durch einen webbasierten Maßnahmenkatalog zur Beseitigung von Unfallhäufungen*. Unveröffentlichter Schlussbericht, Forschungsvorhaben FE 03.0535/2015/FRB des BMVI, Dresden.
- Zierke, B. (2010): *Sichere Gestaltung von Landstraßen durch definierte Straßentypen*. Dissertation, Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme der Technischen Universität Berlin, Berlin.
- Zimmermann, M. (2001): *Quantitative Methoden zur Beurteilung räumlicher Linienführung von Straßen*. Dissertation, Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- Zimmermann, M.; Riffel, S. (2013): *Modellierung des Fahrverhaltens in Kurven*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1097, Bonn.
- Zimmermann, M.; Schweiger, S. (2016): *Betriebsdienst auf minderbreiten Querschnitten - Anforderungen gemäß RSA und ASR A5.2*. Straße und Autobahn, Heft 7/2016, Bonn.
- Zimmermann, M.; Loeben, W.-H.; Roos, R.; Dietze, M.; Lippold, C. (2007): *Kontrolle und Bewertung der räumlichen Linienführung von Außerortsstraßen auf der Grundlage quantitativer Parameter*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 960, Bonn.



## Abkürzungsverzeichnis

A	Klothoide(nparameter)
Abb.	Abbildung
Abw	Abweichung
AKVS	Anweisung zur Kostenermittlung und zur Veranschlagung von Straßenbaumaßnahmen
ASR	Technische Regeln für Arbeitsstätten
AUSRICHT	Ausrichtung
BS	Binderschicht
BST	BisStation
bzw.	beziehungsweise
DS	Deckschicht
DTV	durchschnittlicher täglicher Verkehr
DTV-SV	durchschnittlicher täglicher Verkehr - Schwerverkehr
EDV	elektronische Datenverarbeitung
EKL	Entwurfsklasse
ESN	Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen
EUSka	Elektronische Unfallsteckkarte
EWS	Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FSS	Frostschutzschicht
G	Gerade
Gl.	Gleichung
gUKD	Grundunfallkostendichte
gUKR	Grundunfallkostenrate
H ViSt	Hinweise zur Visualisierung von Entwürfen für außerörtliche Straßen
i. A.	im Allgemeinen
i. d. R.	in der Regel
L	Länge
M EKLBest	Merkblatt zur Übertragung des Prinzips der Entwurfsklassen auf bestehende Straßen
M Uko	Merkblatt zur Örtlichen Untersuchung in Unfallkommissionen
MaKaU	Maßnahmenkatalog gegen Unfallhäufungen
NKV	Nutzen-Kosten-Verhältnis

---

nk_station	Netzknoten-Station
NNK	NachNetzKnoten
o. a.	oben aufgeführten
o. Ä.	oder Ähnliches
o. g.	oben genannten
PMS	Pavement-Management-System
Q	Abbildungsverzerrung
R	Kreisbogen(radius)
RAL	Richtlinien für die Anlage von Landstraßen
RAL-L	Richtlinien für die Anlage von Landstraßen, Teil II: Linienführung
RAL-Q	Richtlinien für die Anlage von Landstraßen, Teil I: Querschnitte
RAS-L	Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Linienführung
RAS-Q	Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Querschnitte
RIN	Richtlinien für die integrierte Netzgestaltung
RPE-Stra	Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen
RStO	Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen
s	Längsneigung
SIB	Straßeninformationsbank
SIPO	Sicherheitspotenzial
SST	Sichtschattentiefe
STOSSRAD	Stoßradius
SW	Sichtweite
Tab.	Tabelle
u. a.	unter anderem
UKD	Unfallkostendichte
UKR	Unfallkostenrate
UR	Unfallrate
usw.	und so weiter
V <sub>85</sub>	85 %-Geschwindigkeit
V <sub>50</sub>	50 %-Geschwindigkeit
V <sub>15</sub>	15 %-Geschwindigkeit
V <sub>e</sub>	Entwurfsgeschwindigkeit
vgl.	vergleiche
VNK	VonNetzKnoten

VST VonStation

z. B. zum Beispiel

ZTV BEA-StB Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die  
Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen in Asphaltbauweisen

ZTV ZEB-StB Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur  
Zustandserfassung und -bewertung von Straßen

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Unfallrate als Funktion der Fahrbahnbreite nach KREBS/GLÖCKNER (1977) .....	4
Abb. 2-2: Unfallrate und Unfallkostenrate (Unfalltypen 1 und 4-7) in Abhängigkeit vom Querschnitt nach BRANNOLTE U. A. (1993) .....	5
Abb. 2-3: Unfallrate und Unfallkostenrate (alle Unfalltypen) in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite nach VIETEN U. A. (2010) .....	6
Abb. 2-4: Unfallrate und Unfallkostenrate in Abhängigkeit vom Kurvenradius nach KREBS/GLÖCKNER (1977) .....	7
Abb. 2-5: Unfallrate in Abhängigkeit vom Kurvenradius, Unfalltypen 1 und 6 nach LEUTZBACH/ZOELLMER (1989) .....	8
Abb. 2-6: Unfallrate und Unfallkostenrate als Funktion der Kurvigkeit nach KREBS/GLÖCKNER (1977) .....	9
Abb. 2-7 Zulässige Radienfolgen nach KÖPPEL/BOCK (1970) .....	11
Abb. 2-8: Einstufungsschema für Landstraßen nach LABS (1986) .....	18
Abb. 2-9: Verhältnis aufeinanderfolgender Radien (FGSV 2012a) .....	30
Abb. 2-10: Radien im Anschluss an Geraden (FGSV 2012a) .....	30
Abb. 2-11: Kritischer Sichtschattenbereich (FGSV 2012a) .....	32
Abb. 2-12: Ermittlung des Nutzens einer Maßnahme nach KRAUSE (2001) .....	35
Abb. 3-1: Methodisches Vorgehen .....	40
Abb. 3-2: Achse der SIB (links) und nachtrassierte Achse aus Befahrungsdaten (rechts) eines Abschnitts der Staatsstraße S 25 (Luftbild: <a href="https://geodienste.sachsen.de">https://geodienste.sachsen.de</a> ) .....	42
Abb. 3-3: Höhenpunkte eines Abschnitts der Staatsstraße S 24 aus Befahrungsdaten (blau) und SIB-Daten (grün) .....	42
Abb. 3-4: Forschungsfahrzeug "UNO" der TU Dresden .....	43
Abb. 3-5: Achstrassierung im Straßenentwurfsprogramm CARD/1 .....	44
Abb. 3-6: Abgrenzung der Straßenabschnitte, Abbildung in Anlehnung an die RAL (FGSV 2012a) .....	45
Abb. 3-7: Prinzipskizze zur Ermittlung von kritischen Sichtschattentiefen .....	50
Abb. 3-8: Prinzipskizze zur Ermittlung von verdeckten Kurvenbeginnen .....	53
Abb. 3-9: Verteilung der relativen Unfallkenngrößen differenziert nach der Abschnittslänge (Unfalltyp 1 und 6, Unfallkategorien 1 bis 4) .....	57
Abb. 3-10: Prüfung der Linearitätsbedingung zwischen der Unfalldichte und der durchschnittlich täglichen Fahrleistung .....	59
Abb. 3-11: Fahrurfälle mit der Charakteristik der Unfallstelle „Kurve“ auf einem Streckenabschnitt der B 6 in Sachsen (Luftbild: <a href="https://geodienste.sachsen.de">https://geodienste.sachsen.de</a> ) .....	60
Abb. 3-12: Anteil der Fahrurfälle (Unfallkategorie 1 bis 3) mit der Charakteristik der Unfallstelle „Kurve“ in Abhängigkeit von der Entfernung zum Kurvenende .....	61
Abb. 3-13: Prinzipskizze zur Zuordnung von Fahrurfällen zu verdeckten Kurvenbeginnen .....	65
Abb. 4-1: Darstellung der Streckenkollektive .....	67
Abb. 4-2: Verteilung der Fahrbahnbreiten differenziert nach den Streckenkollektiven .....	68
Abb. 4-3: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite (Streckenkollektive 2 bis 5) .....	69

Abb. 4-4: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite (Streckenkollektive 2 bis 5, UR und UKR differenziert nach Unfalltyp 1 - grün und Unfalltyp 6 - orange).....	70
Abb. 4-5: Verteilung der Kurvenradien differenziert nach den Breitenklassen (Streckenkollektive 2 bis 5).....	71
Abb. 4-6: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite (Streckenkollektive 2 bis 5, UR und UKR differenziert nach relationstrassierten (rel. - lila) und nicht relationstrassierten (n. rel. - rot) Strecken).....	71
Abb. 4-7: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite (Streckenkollektiv 1).....	72
Abb. 4-8: Verteilung der Kurvenradien differenziert nach den Teilkollektiven .....	73
Abb. 4-9: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit vom Kurvenradius .....	74
Abb. 4-10: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit vom Kurvenradius ( $L_{\text{Kurve}} \geq 50 \text{ m}$ ) .....	74
Abb. 4-11: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit vom Kurvenradius ( $L_{\text{Kurve}} < 50 \text{ m}$ ) .....	75
Abb. 4-12: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation gegensinnig gekrümmter Kurvenradien ( $R-R \curvearrowright$ ) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung .....	76
Abb. 4-13: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation gegensinnig gekrümmter Kurvenradien ( $R-R \curvearrowright$ ) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung (Streckenkollektiv 2) .....	77
Abb. 4-14: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation gegensinnig gekrümmter Kurvenradien ( $R-R \curvearrowright$ ) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung ( $L_{\text{Kurve}} \geq 50 \text{ m}$ ) .....	77
Abb. 4-15: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation gleichsinnig gekrümmter Kurvenradien ( $R-R \curvearrowleft$ ) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung .....	78
Abb. 4-16: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation gleichsinnig gekrümmter Kurvenradien ( $R-R \curvearrowleft$ ) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung (Klasse der Fahrbahnbreite 5,00 m bis 6,50 m) .....	79
Abb. 4-17: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation gleichsinnig gekrümmter Kurvenradien ( $R-R \curvearrowleft$ ) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung (Klasse der Fahrbahnbreite 5,00 m bis 6,50 m) .....	79
Abb. 4-18: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate von Radien im Anschluss an Geraden (Relation G-R) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung.....	80
Abb. 4-19: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate von Radien im Anschluss an Geraden (Relation G-R) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung (Streckenkollektive 1, 3, 4 und 5).....	81
Abb. 4-20: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate von Radien im Anschluss an Geraden (Relation G-R) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung ( $L_{\text{Kurve}} < 50 \text{ m}$ ) .....	81
Abb. 4-21: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate von Radien im Anschluss an Geraden (Relation G-R) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung (Klasse der Fahrbahnbreite 7,00 m bis 8,50 m) .....	82
Abb. 4-22: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Kurvigkeit des Einzelbogens .....	83
Abb. 4-23: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Kurvigkeit- differenz.....	84

---

Abb. 4-24: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Kurvigkeitsdifferenz ( $L_{\text{Kurve}} \geq 50 \text{ m}$ ).....	84
Abb. 4-25: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate von Streckenabschnitten in Abhängigkeit von der Dichte an kritischen Sichtschattenbereichen.....	85
Abb. 4-26: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate von Streckenabschnitten in Abhängigkeit von der Länge der Sichtschattenstrecke.....	86
Abb. 4-27: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate von Streckenabschnitten in Abhängigkeit von der Dichte an verdeckten Kurvenbeginnen .....	87
Abb. 4-28: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate verdeckter Kurvenbeginne in Abhängigkeit vom Richtungsänderungswinkel .....	88
Abb. 4-29: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate verdeckter Kurvenbeginne in Abhängigkeit von der Relationstrassierung (Maß der Abweichung von R-R und G-R) .....	88
Abb. 5-1: Schemadarstellung für den Datenfluss in PMS (KRAUSE/MAERSCHALK 2010) .....	98
Abb. 5-2: Lorenzkurve der vermeidbaren Unfallkosten (gesamtes Streckenkollektiv).....	103

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Unfallhäufigkeit und Gefahrengrad zwei- und vierspuriger Straßen in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite und der Spurenzahl (BITZL 1964) .....	3
Tab. 2-2: Straßenquerschnittsmaße einbahnig-zweistreifiger Straßen nach den RAS-Q (FGSV 1982) .....	5
Tab. 2-3: Unfallrate und Unfallkostenrate in Abhängigkeit vom Radienverhältnis (alle Unfalltypen) nach LEUTZBACH/ZOELLMER (1989).....	12
Tab. 2-4: Kurvenmindestradien bei der Elementfolge G - A - R (LIPPOLD 1997) .....	13
Tab. 2-5: Zulässige Bereiche für Abbildungsverzerrungen nach APPELT (1998) .....	15
Tab. 2-6: Orientierungssichtweite in Abhängigkeit von der Perzentilgeschwindigkeit $V_{85}$ (SCHULZ 2012) .....	16
Tab. 2-7: Klassifizierung der Sicherheitskriterien nach LAMM U. A. (1992).....	19
Tab. 2-8: Klassifizierungssystem des Sicherheitsmoduls nach LAMM U. A. (1992) .....	20
Tab. 2-9: Streckentypisierung nach BAKABA (2001).....	21
Tab. 2-10: Einbahnige Regelquerschnitte nach den RAL (FGSV 2012a).....	28
Tab. 2-11: Empfohlene Radien und Mindestlängen von Kreisbögen (FGSV 2012a)....	29
Tab. 2-12: Auswirkungen von Defiziten der räumlichen Linienführung (FGSV 2012a) .....	31
Tab. 2-13: Mindestvoraussetzungen für die Kennzeichnung von Abschnitten innerhalb von Streckenzügen nach dem M EKLBest (FGSV 2018).....	33
Tab. 3-1: Vollständigkeit und Qualität ausgewählter SIB-Daten.....	41
Tab. 3-2: Bereiche der „Radientulpe“ und deren mathematische Beschreibung .....	47
Tab. 3-3: Radien im Anschluss an Geraden - mathematische Beschreibung.....	48
Tab. 3-4: Formeln zur Berechnung der maßgebenden Stationen in Abhängigkeit von den Elementfolgen .....	52
Tab. 3-5: Klassifizierung der Fahrbahnbreite .....	58
Tab. 3-6: Klassifizierung der Kurvenradien .....	61
Tab. 3-7: Klassifizierung der Elementrelationen .....	62
Tab. 3-8: Klassifizierung der Kurvigkeit des Einzelbogens.....	63
Tab. 3-9: Klassifizierung der Kurvigkeitsdifferenzen .....	63
Tab. 3-10: Anzahl der Unfälle in Abhängigkeit von der Länge des Pufferbereichs bei Sichtschattenbereichen .....	64
Tab. 3-11: Klassifizierung des Richtungsänderungswinkels .....	65
Tab. 4-1: Übersicht der Streckenkollektive .....	66
Tab. 4-2: Anteil der Unfälle (Kategorie/Typ) differenziert nach der Fahrbahnbreite.....	69
Tab. 5-1: Klassifizierung der Abweichungen.....	90
Tab. 5-2: Bewertungen des Kreisbogenradius.....	91
Tab. 5-3: Empfehlungen für entwurfstechnische Maßnahmen - Linienführung .....	92
Tab. 5-4: Bewertungen der Fahrbahnbreite .....	95
Tab. 5-5: Matrix zur Ableitung der Um-/Ausbauempfehlungen .....	96
Tab. 5-6: Übersicht zur Begriffssystematik im Straßenbau - bauliche Erhaltung (in Anlehnung an WELLNER 2015).....	97
Tab. 5-7: Ableitung zulässiger Erhaltungsmaßnahmen .....	99
Tab. 5-8: Um-/Ausbauempfehlungen für PMS .....	101
Tab. 5-9: Grundunfallkostenraten (gUKR) nach FGSV 2003b .....	102
Tab. 5-10: Wichtungsfaktor für Um- und Ausbaumaßnahmen .....	104

## **Anhangverzeichnis**

<b>Anhang A</b>	<b>RPE-Stra 01, Anhang 8 .....</b>	<b>134</b>
<b>Anhang B</b>	<b>Querschnittsdaten der SIB .....</b>	<b>135</b>
<b>Anhang C</b>	<b>Klassifizierung der Straßenverkehrsunfälle.....</b>	<b>137</b>
<b>Anhang D</b>	<b>Zusammenhang zwischen Unfalldichte und Fahrleistung .....</b>	<b>140</b>
<b>Anhang E</b>	<b>Unfallauswertungen zur Fahrbahnbreite .....</b>	<b>141</b>
<b>Anhang F</b>	<b>Unfallauswertungen zum Kurvenradius .....</b>	<b>143</b>
<b>Anhang G</b>	<b>Unfallauswertungen zu den Elementrelationen R-R.....</b>	<b>145</b>
G.1	Folge gegenseitig gekrümmter Kurven .....	145
G.2	Folge gleichsinnig gekrümmter Kurven.....	147
<b>Anhang H</b>	<b>Unfallauswertungen zu Radien im Anschluss an Geraden .....</b>	<b>148</b>
<b>Anhang I</b>	<b>Kurvigkeit des Einzelbogens und Kurvigkeitsdifferenzen .....</b>	<b>150</b>
I.1	Häufigkeitsverteilung .....	150
I.2	Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Kurvigkeit des Einzelbogens und der UR/UKR .....	151
I.3	Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Kurvigkeitsdifferenz und der UR/UKR .....	153
<b>Anhang J</b>	<b>PMS.....</b>	<b>156</b>



## Anhang A RPE-Stra 01, Anhang 8

	<input type="checkbox"/> gut <input type="checkbox"/> mäßig <input type="checkbox"/> kritisch <input type="checkbox"/> schlecht	Bemerkungen	
Streckencharakteristik	Kurvenmindestradius	<input type="checkbox"/>	
	Kuppen-, Wannenausrundung	<input type="checkbox"/>	
	Höchst Längsneigung	<input type="checkbox"/>	
	Querneigung	<input type="checkbox"/>	
	Höhenzwangspunkte	<input type="checkbox"/>	
	• Unterführungen (Lichtraumprofil)	<input type="checkbox"/>	
	• Bäume	<input type="checkbox"/>	
Querschnittselemente	Gesamte Querschnittsbreite	<input type="checkbox"/>	
	Befestigte Fahrbahnbreite	<input type="checkbox"/>	
	1. Fahrstreifen (Breite und Zustand)	<input type="checkbox"/>	
	2. Fahrstreifen (Breite und Zustand)	<input type="checkbox"/>	
	3. Fahrstreifen (Breite und Zustand)	<input type="checkbox"/>	
	4. Fahrstreifen (Breite und Zustand)	<input type="checkbox"/>	
	Standstreifen (Breite und Zustand)	<input type="checkbox"/>	
	Sonstige Streifen (Breite und Zustand)	<input type="checkbox"/>	
	Bankette (Zustand)	<input type="checkbox"/>	
	Böschungen (Zustand)	<input type="checkbox"/>	
	Oberflächenentwässerung (Zustand)	<input type="checkbox"/>	
	Rad-, Gehwege (Breite und Zustand)	<input type="checkbox"/>	
	Hochborde	<input type="checkbox"/>	
Sonstiges	Knotenpunkte (Leistungsfähigkeit)	<input type="checkbox"/>	
	Grundstückzufahrten (Zustand)	<input type="checkbox"/>	
	Eignung von Umleitungsstrecken	<input type="checkbox"/>	
	Brückenbelag	<input type="checkbox"/>	
	Nebenanlagen	<input type="checkbox"/>	
	Ausstattung	<input type="checkbox"/>	
	Umweltrelevante Gesichtspunkte	<input type="checkbox"/>	
	<input type="checkbox"/>		

## Anhang B Querschnittsdaten der SIB

Die Informationen zu den Querschnittsbreiten sind in den Straßeninformationsbanken (SIB) flächendeckend vorhanden. Für das sächsische Staatsstraßennetz sind beispielsweise Datensätze für 97 % der Streckenabschnitte in den SIB enthalten. Zur Gewährleistung einer plausiblen Datengrundlage wurden diese Daten auch auf deren Qualität geprüft.

Dazu wurde auf Befahrungsdaten des Streckenkollektivs 5 (vgl. Tab. 4-1) zurückgegriffen. Die Untersuchungstrecken wurden mit dem Forschungsfahrzeug UNO messtechnisch erfasst. Das Fahrzeug ist u. a. mit einem hochgenauen, satellitengestützten Positionierungssystem (Applanix POS LV 610) und Stereo-Frontkameras ausgestattet. Die Kameras sind photogrammetrisch kalibriert und eignen sich somit zur relativen Objektvermessung mit absolutem Koordinatenbezug.

Die Lage der Fahrbahnrandpunkte kann mit dem Webapplet „Phoros“ aus mehreren Befahrungsbildern (auch der Gegenrichtung) berechnet, mit weiteren Eigenschaften versehen und in einer Datenbank gespeichert werden (vgl. Abb. B-1).



Abb. B-1: Ausschnitt aus dem Webapplet "Phoros" der TU Dresden

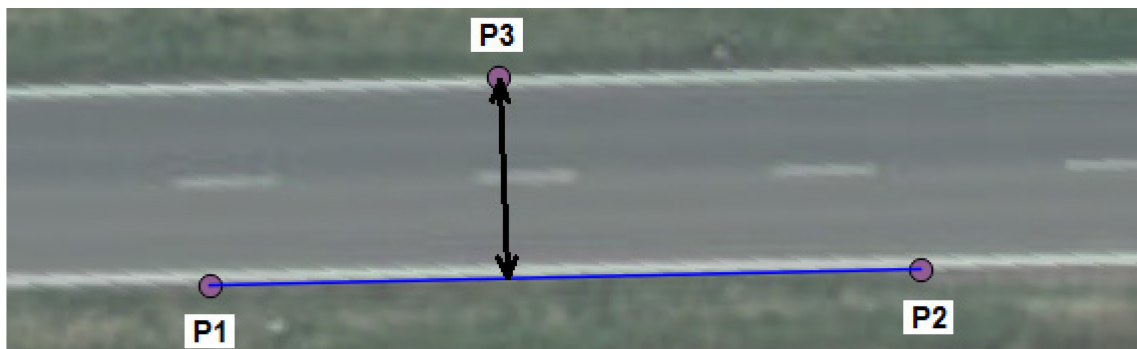


Abb. B-2: Fahrbahnrandpunkte der B 181 bei Leipzig (Luftbild: geodienste.sachsen.de)

Zur Ermittlung der Fahrbahnbreite sind drei Fahrbahnrandpunkte erforderlich (vgl. Abb. B-2). Auf Grundlage der Punkte P1 und P2 wird anhand von definierten Merkmalen automatisch eine Linie (blau dargestellt) berechnet („Triggerfunktion“). Der senkrechte Abstand des Punktes P3 zum gegenüberliegenden Fahrbahnrand (schwarze Linie) kann mit einer räumlichen Datenbankabfrage bestimmt werden (bei PostgreSQL mit der Funktion „ST\_Distance“).

Insgesamt wurde für 82 Querschnitte verteilt auf 26 Straßen in drei Bundesländern die Fahrbahnbreite auf Grundlage der Befahrungsdaten ermittelt. Diese Breiten wurden den Angaben aus den SIB gegenübergestellt (vgl. Abb. B-3). Die Differenz der beiden Werte ( $\Delta B = B_{SIB} - B_{UNO}$ ) ist auf der x-Achse dargestellt und wird über die Fahrbahnbreite der SIB abgetragen.

Die Differenzen zwischen den aus den SIB entnommenen und den messtechnisch berechneten Werten liegen zwischen  $-0,80 \text{ m} \leq \Delta B \leq 0,80 \text{ m}$ . 93 % der Messwerte haben eine Abweichung von  $|\Delta B| \leq 0,50 \text{ m}$ . Dies entspricht bereits der Toleranz der photogrammetrischen Vermessung<sup>18</sup>.

Demnach stimmt der Großteil der Datensätze aus den SIB mit den messtechnisch erhobenen Werten überein. Weitere Abweichungen können zudem mit der Genauigkeit der Stationszuordnung begründet werden. Die Qualität der Querschnittsdaten der SIB hinsichtlich der Fahrbahnbreite kann folglich als gut eingeschätzt werden.

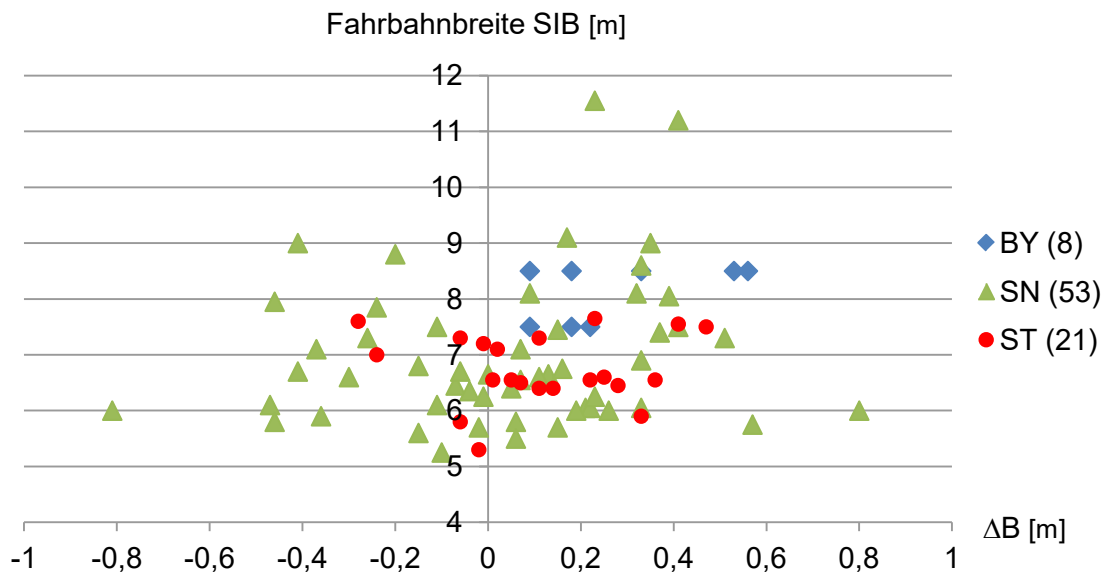


Abb. B-3: Vergleich der Angaben zur Fahrbahnbreite aus SIB und UNO

<sup>18</sup> Die Lagegenauigkeit der vermessenen Punkte hängt von mehreren Faktoren ab, z. B. von der Schärfe des Bildes (Erkennbarkeit des Fahrbahnrandes), Anzahl der verfügbaren Bilder und der Genauigkeit der zugrunde liegenden Kalibrierung.

## Anhang C Klassifizierung der Straßenverkehrsunfälle

### Unfallkategorie

Die Unfallkategorie beschreibt die schwerste Unfallfolge. Sie wird in sechs Klassen eingeteilt (Tab. C-1). Unfälle mit schwerem Personenschaden U(SP) umfassen die Kategorien 1 und 2. Unfälle mit Personenschäden U(P) werden über die Kategorien 1 - 3 charakterisiert. Der durchschnittliche Unfallkostensatz (letzte Spalte) charakterisiert die Folgekosten von Unfällen (in Abhängigkeit von der Kategorie).

Tab. C-1: Beschreibung der Unfallkategorien nach FGSV (2012c)

schwerste Unfallfolge	Unfallkategorie	Erläuterung	Kostensatz KS <sub>U</sub> <sup>19</sup> [€/U]
Unfall mit Getöteten	U(GT) Kat. 1	mindestens <b>ein</b> getöteter Verkehrsteilnehmer	266.000 €
Unfall mit Schwerverletzten	U(SV) Kat. 2	mindestens <b>ein</b> schwerverletzter Verkehrsteilnehmer, aber <b>keine</b> Getöteten	
Unfall mit Leichtverletzten	U(LV) Kat. 3	mindestens <b>ein</b> leichtverletzter Verkehrsteilnehmer, aber <b>keine</b> Getöteten und <b>keine</b> Schwerverletzten	24.700 €
Unfall mit schwerwiegenden Sachschaden	U(SS)	Kat. 4	17.900 €
		Kat. 6	
sonstiger Unfall mit Sachschaden	U(LS) Kat. 5	Sachschadenumfälle - Straftatbestand oder Owi-Anzeige ohne Einfluss berauschender Mittel, bei denen alle Fahrzeuge fahrbereit sind - mit lediglich geringfügiger Ordnungswidrigkeit (Verwarnung), unabhängig, ob Kfz fahrbereit oder nicht fahrbereit	4.190 €

<sup>19</sup> Kostensatz KS<sub>U</sub> für Landstraßen

## Unfalltyp

Der Unfalltyp beschreibt die Konfliktsituation, infolge dessen es zum Unfall gekommen ist.

Tab. C-2: Beschreibung der Unfalltypen nach FGSV (2012c)

	Unfalltyp	Erläuterung
1	Fahrerfall (F)	Der Unfall wurde ausgelöst durch den Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug (wegen nicht angepasster Geschwindigkeit oder falscher Einschätzung des Straßenverlaufs, des Straßenzustandes o. Ä.), ohne dass andere Verkehrsteilnehmer dazu beigetragen haben. Infolge unkontrollierter Fahrzeugbewegungen kann es dann aber zum Zusammenstoß mit anderen Verkehrsteilnehmern gekommen sein.
2	Abbiege-Unfall (AB)	Der Unfall wurde ausgelöst durch einen Konflikt zwischen einem, den Vorrang anderer zu beachtenden Abbieger und einem aus gleicher oder entgegengesetzter Richtung kommenden Verkehrsteilnehmer (auch Fußgänger!) an Kreuzungen, Einmündungen, Grundstücks- oder Parkplatzzufahrten.
3	Einbiegen/Kreuzen-Unfall (EK)	Der Unfall wurde ausgelöst durch einen Konflikt zwischen einem einbiegenden oder kreuzenden Wartepflichtigen und einem vorfahrtberechtigten Fahrzeug an Kreuzungen, Einmündungen oder Ausfahrten von Grundstücken und Parkplätzen.
4	Überschreiten-Unfall (ÜS)	Der Unfall wurde ausgelöst durch einen Konflikt zwischen einem Fahrzeug und einem Fußgänger auf der Fahrbahn, sofern dieser nicht in Längsrichtung ging und sofern das Fahrzeug nicht abgebogen ist. Dies gilt auch, wenn der Fußgänger nicht angefahren wurde.
5	Unfall durch ruhenden Verkehr (RV)	Der Unfall wurde ausgelöst durch einen Konflikt zwischen einem Fahrzeug des fließenden Verkehrs und einem Fahrzeug, das parkt/hält bzw. Fahrmanöver im Zusammenhang mit dem Parken/Halten durchführte.
6	Unfall im Längsverkehr (LV)	Der Unfall wurde ausgelöst durch einen Konflikt zwischen Verkehrsteilnehmern, die sich in gleicher oder entgegengesetzter Richtung bewegten, sofern dieser Konflikt nicht einem anderen Unfalltyp entspricht.
7	Sonstiger Unfall (SO)	Unfall, der sich nicht den Typen 1 - 6 zuordnen lässt. Beispiele: Wenden, Rückwärtsfahren, Parker untereinander, Hindernis oder Tier auf der Fahrbahn, plötzlicher Fahrzeugschaden (Bremsversagen, Reifenschäden o. Ä.).

### Unfallart

Die Unfallart beschreibt den Unfallablauf (Bewegungsrichtung/Zusammenstoß) der beteiligten Fahrzeuge.

Tab. C-3: Beschreibung der Unfallarten nach DESTATIS (2017)

Unfallart	Erläuterung
1	Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das anfährt, anhält oder im ruhenden Verkehr steht
2	Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das vorausfährt oder wartet
3	Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das seitlich in gleicher Richtung fährt
4	Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das entgegenkommt
5	Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das einbiegt oder kreuzt
6	Zusammenstoß zwischen Fahrzeug und Fußgänger
7	Aufprall auf ein Hindernis auf der Fahrbahn
8/9	Abkommen von der Fahrbahn nach rechts/links
10	Unfall anderer Art

### Charakteristik der Unfallstelle

Die Charakteristik der Unfallstelle spezifiziert die Lage bzw. die örtlichen Randbedingungen des Unfalls.

Tab. C-4: Beschreibung der Charakteristik der Unfallstelle nach DESTATIS (2017)

Nummer	Erläuterung
1	Kreuzung
2	Einmündung
3	Grundstücksein- oder -ausfahrt
4	Steigung
5	Gefälle
6	Kurve

### Anhang D Zusammenhang zwischen Unfalldichte und Fahrleistung

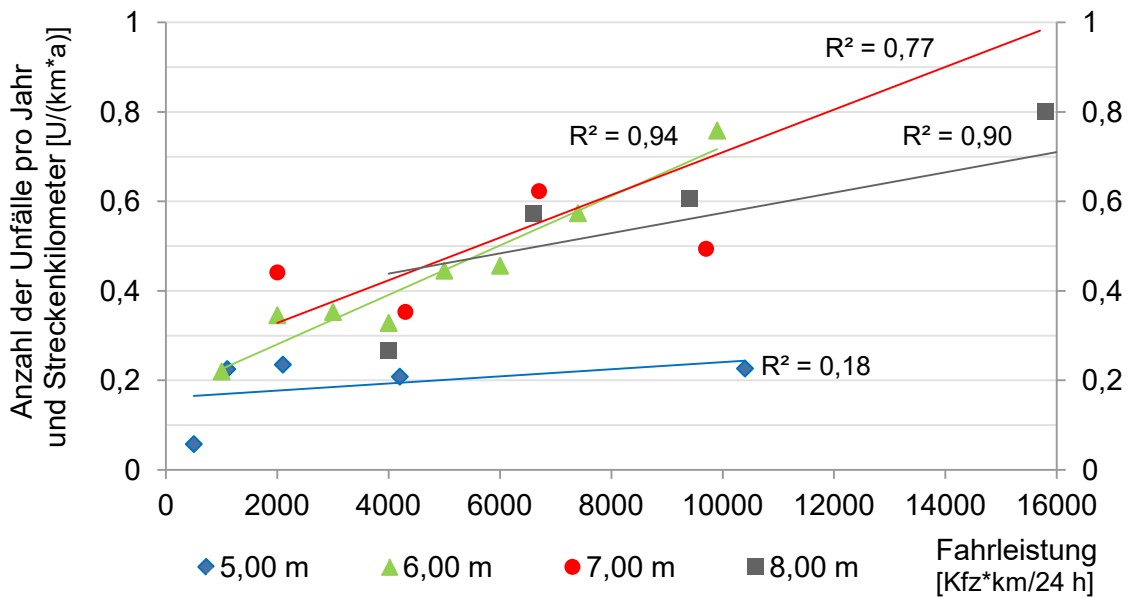


Abb. D-1: Zusammenhang zwischen der Unfalldichte und der durchschnittlich täglichen Fahrleistung differenziert nach der Fahrbahnbreite (Teil 1)

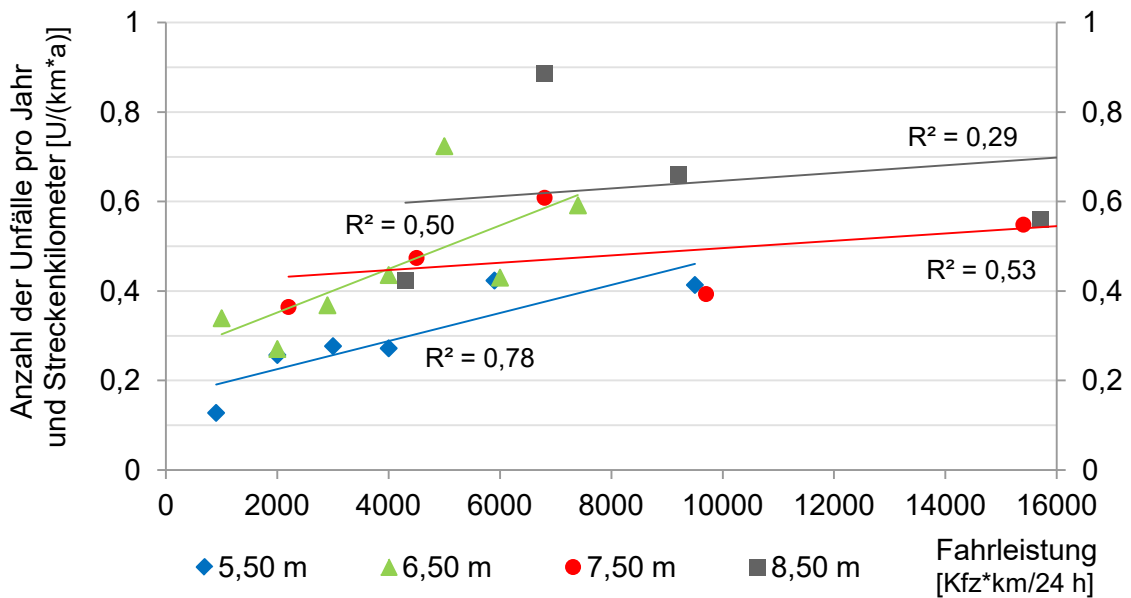


Abb. D-2: Zusammenhang zwischen der Unfalldichte und der durchschnittlich täglichen Fahrleistung differenziert nach der Fahrbahnbreite (Teil 2)

## Anhang E Unfallauswertungen zur Fahrbahnbreite

### Auswertungen zu den Streckenkollektiven 2 bis 5

#### DTV ≤ 4.000 Kfz/24h

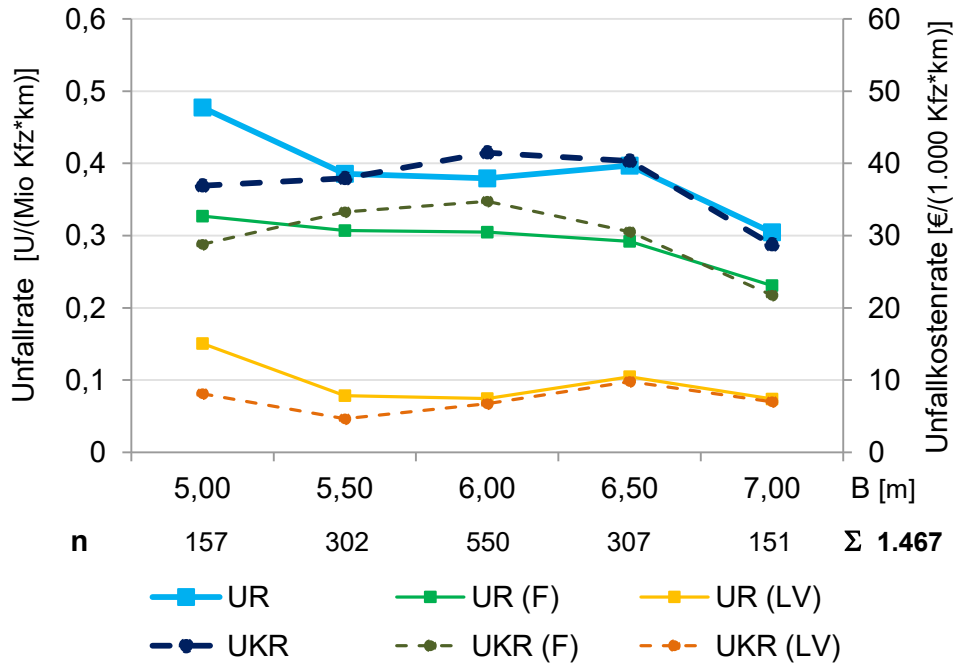


Abb. E-1: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite (Streckenkollektive 2 bis 5 – DTV ≤ 4.000 Kfz/24h)

#### DTV > 4.000 Kfz/24h

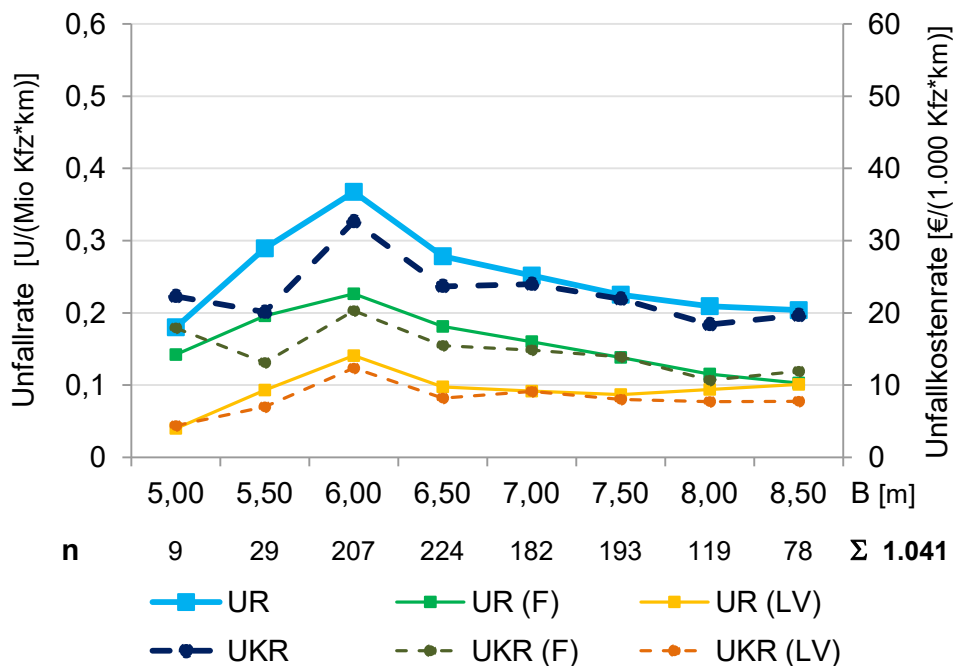


Abb. E-2: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite (Streckenkollektive 2 bis 5 – DTV > 4.000 Kfz/24h)



**DTV ≤ 4.000 Kfz/24h**

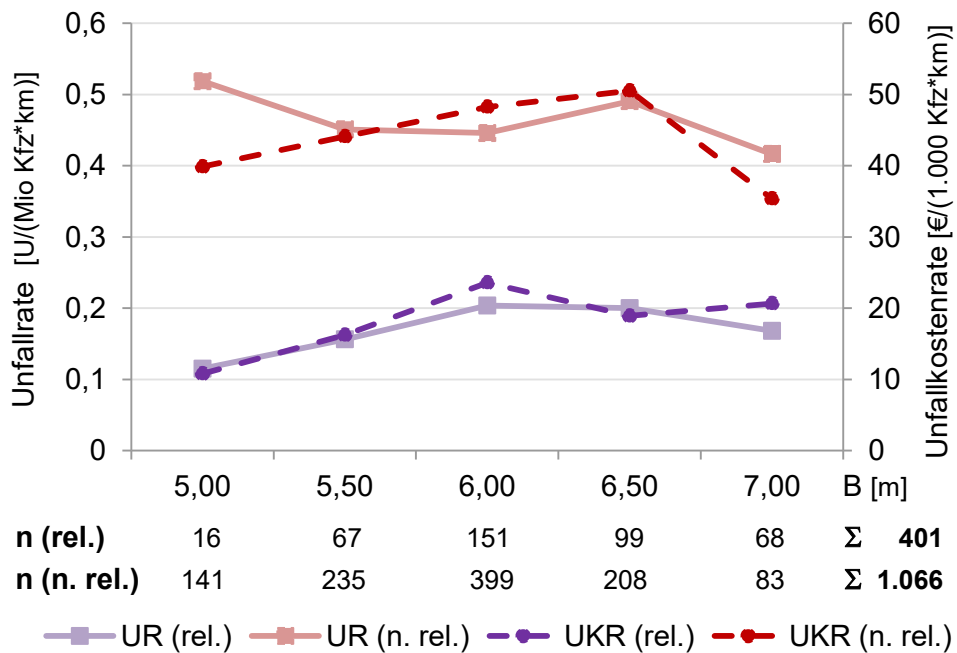


Abb. E-3: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite (Streckenkollektive 2 bis 5 – DTV ≤ 4.000 Kfz/24h, UR und UKR differenziert nach relationstrassierten (rel. - lila) und nicht relationstrassierten (n. rel. - rot) Strecken)

**DTV > 4.000 Kfz/24h**

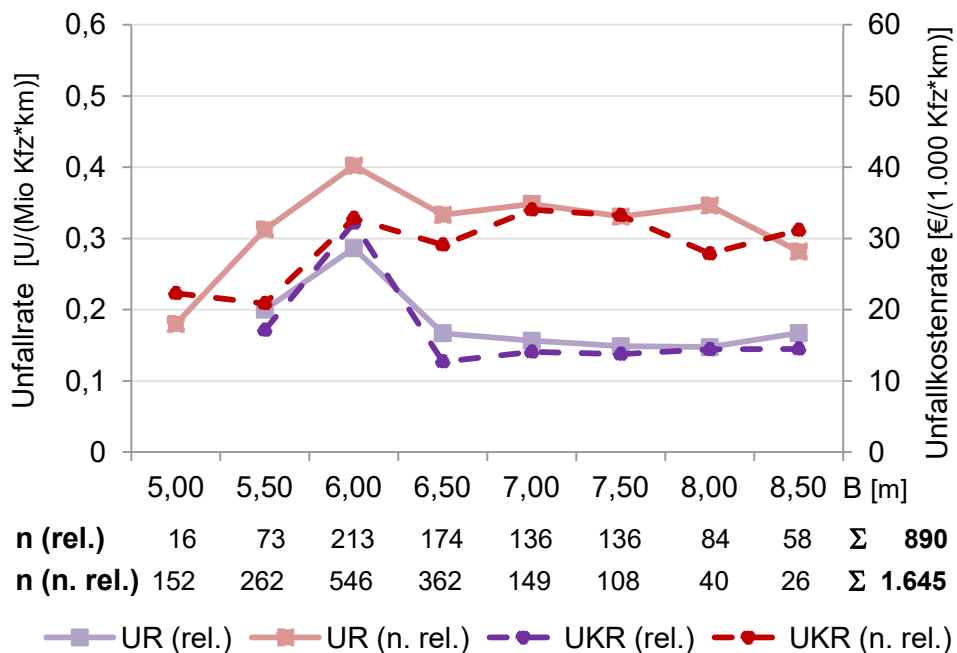


Abb. E-4: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite (Streckenkollektive 2 bis 5 – DTV > 4.000 Kfz/24h, UR und UKR differenziert nach relationstrassierten (rel. - lila) und nicht relationstrassierten (n. rel. - rot) Strecken)

## Anhang F Unfallauswertungen zum Kurvenradius

### Streckenkollektive 1, 3, 4 und 5

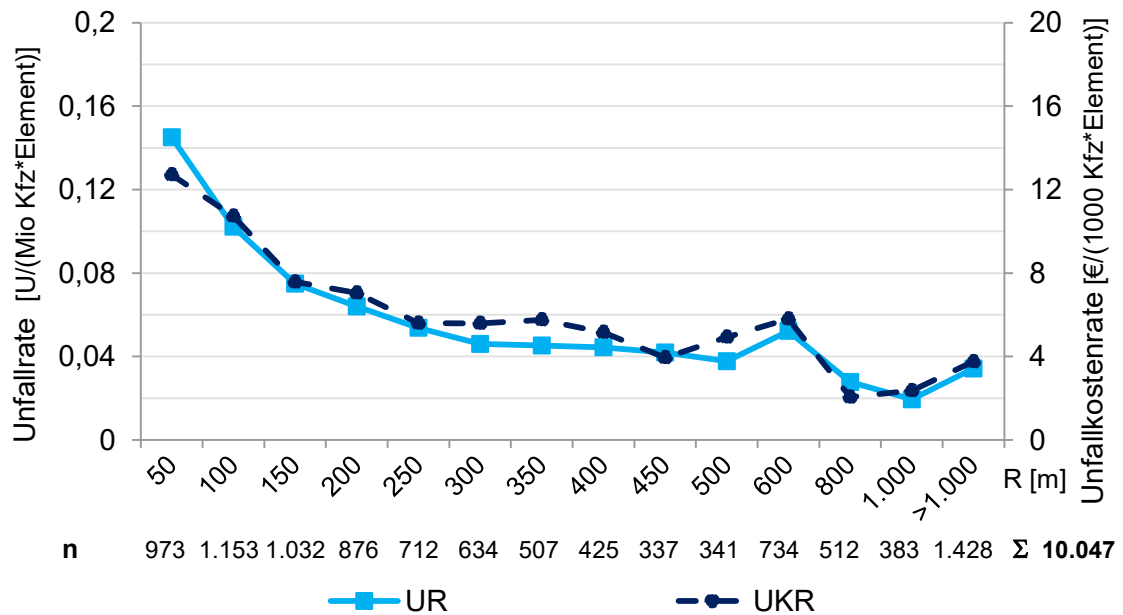


Abb. F-1: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit vom Kurvenradius (Streckenkollektive 1, 3, 4 und 5)

### Streckenkollektiv 2

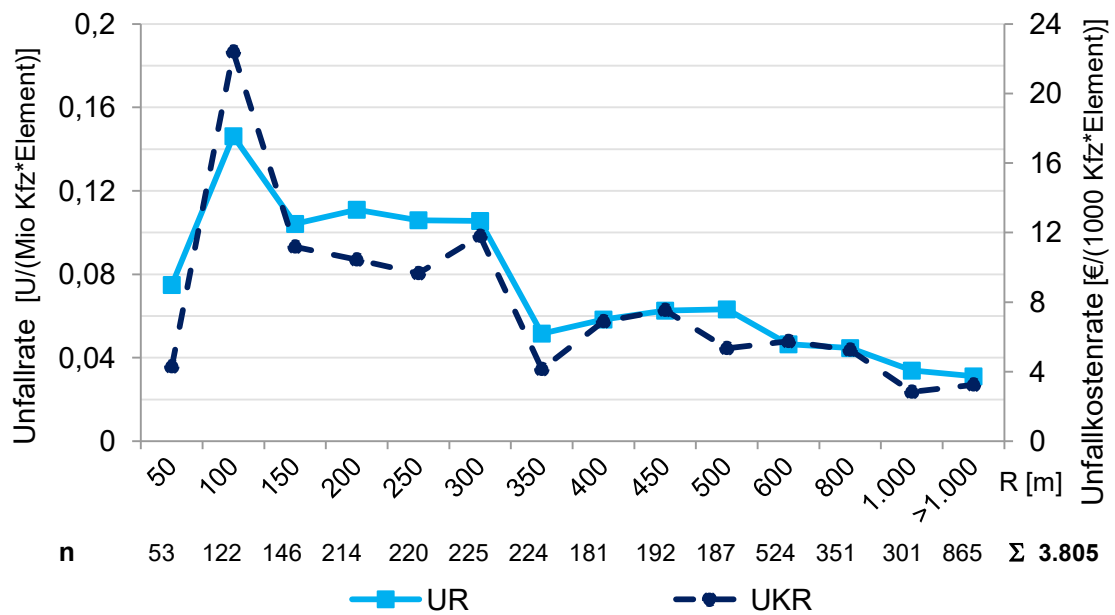


Abb. F-2: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit vom Kurvenradius (Streckenkollektiv 2)

**Klasse der Fahrbahnbreite 5,00 m bis 6,50 m**

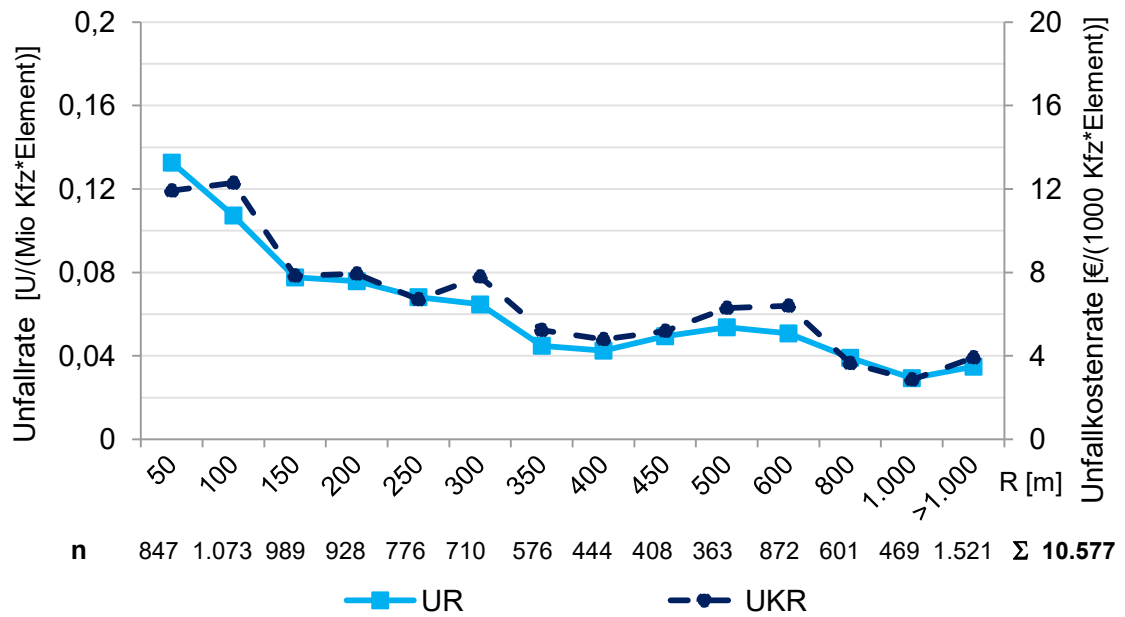


Abb. F-3: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit vom Kurvenradius (Klasse der Fahrbahnbreite 5,00 m bis 6,50 m)

**Klasse der Fahrbahnbreite 7,00 m bis 8,50 m**

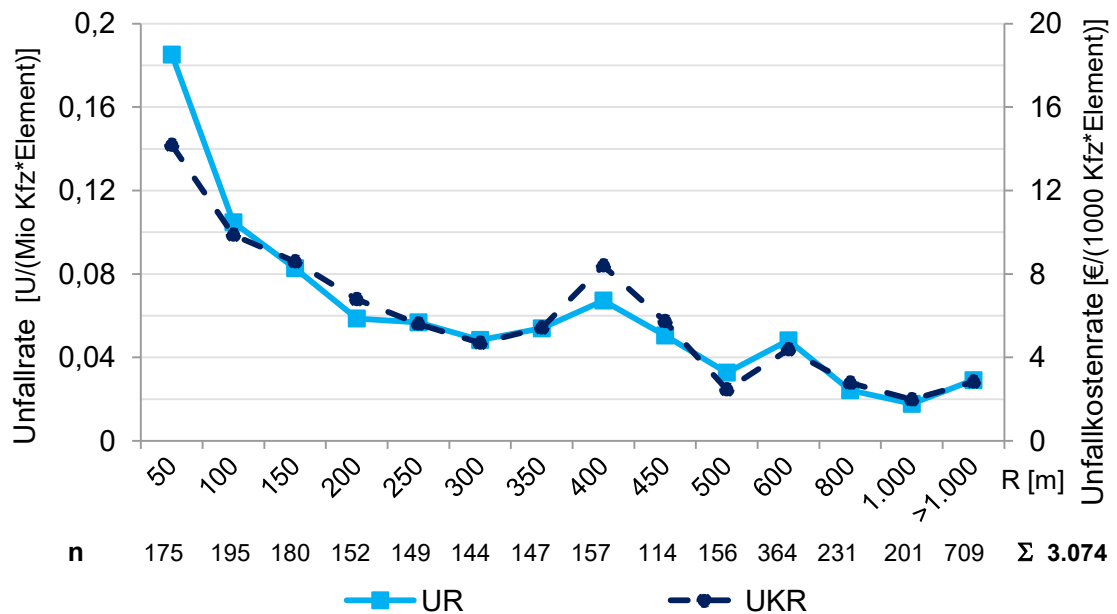


Abb. F-4: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit vom Kurvenradius (Klasse der Fahrbahnbreite 7,00 m bis 8,50 m)

## Anhang G Unfallauswertungen zu den Elementrelationen R-R

### G.1 Folge gegenseitig gekrümmter Kurven

#### Streckenkollektive 1, 3, 4 und 5

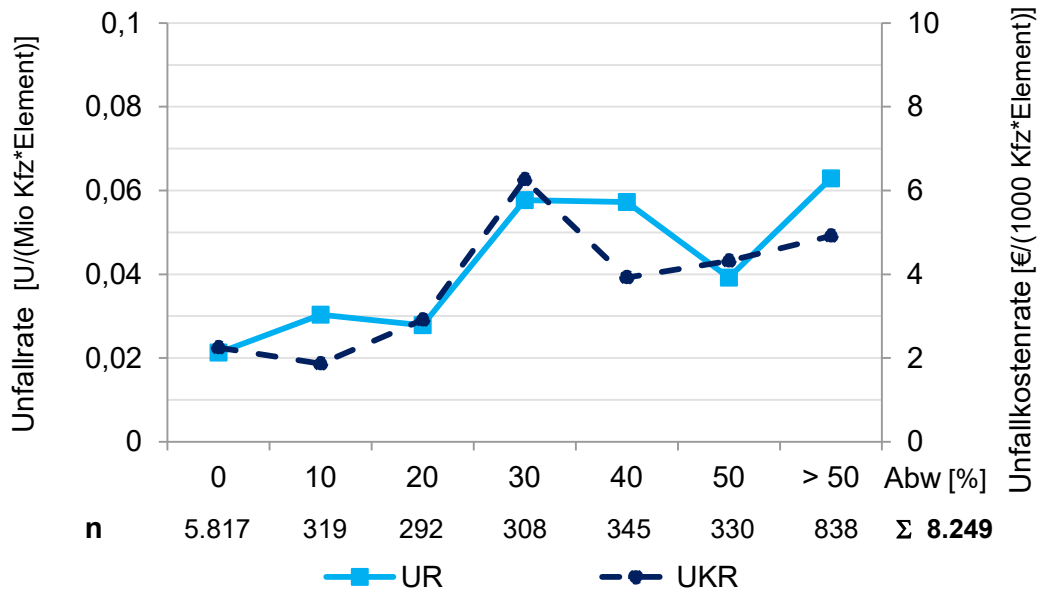


Abb. G-1: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation gegenseitig gekrümmter Kurvenradien (R-R  $\leftrightarrow$ ) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung (Streckenkollektive 1, 3, 4 und 5)

#### Länge der Kurve L < 50 m

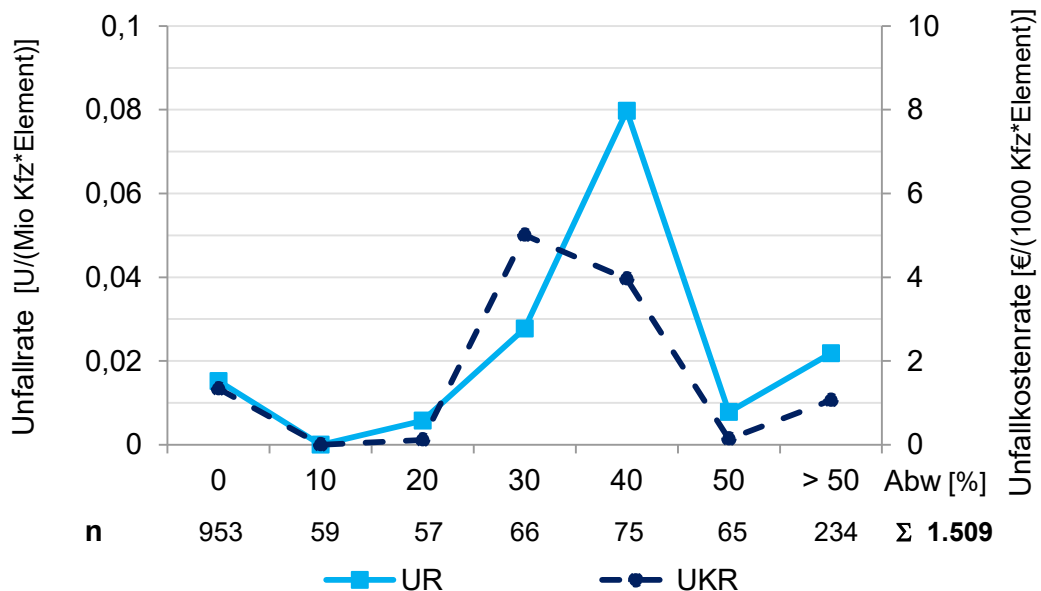


Abb. G-2: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation gegenseitig gekrümmter Kurvenradien (R-R  $\leftrightarrow$ ) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung ( $L_{\text{Kurve}} < 50 \text{ m}$ )

**Klasse der Fahrbahnbreite 5,00 m bis 6,50 m**

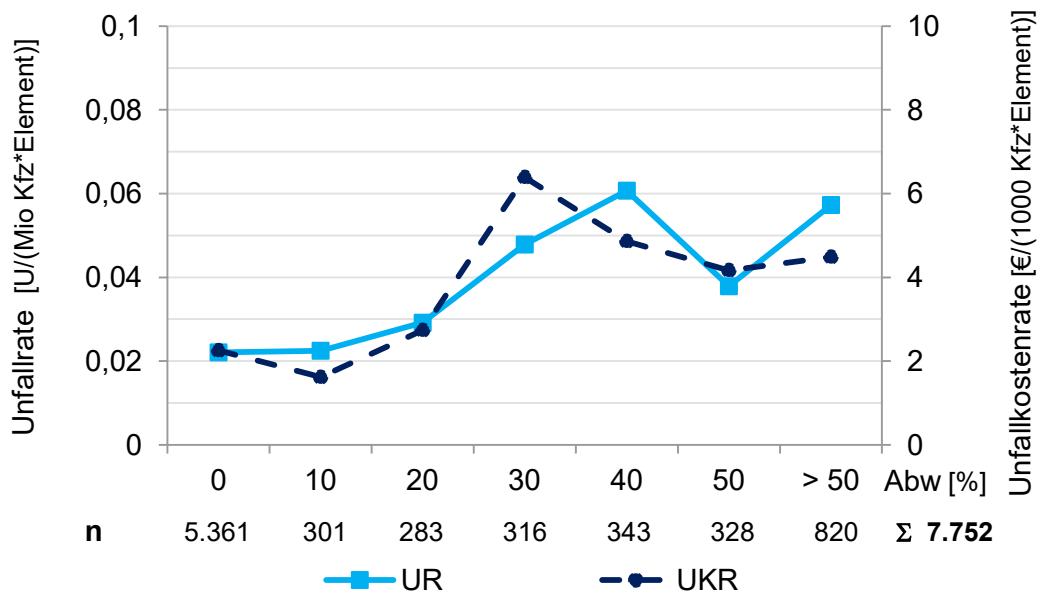


Abb. G-3: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation gegenseitig gekrümmter Kurvenradien (R-R ⇔) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung (Klasse der Fahrbahnbreite 5,00 m bis 6,50 m)

**Klasse der Fahrbahnbreite 7,00 m bis 8,50 m**

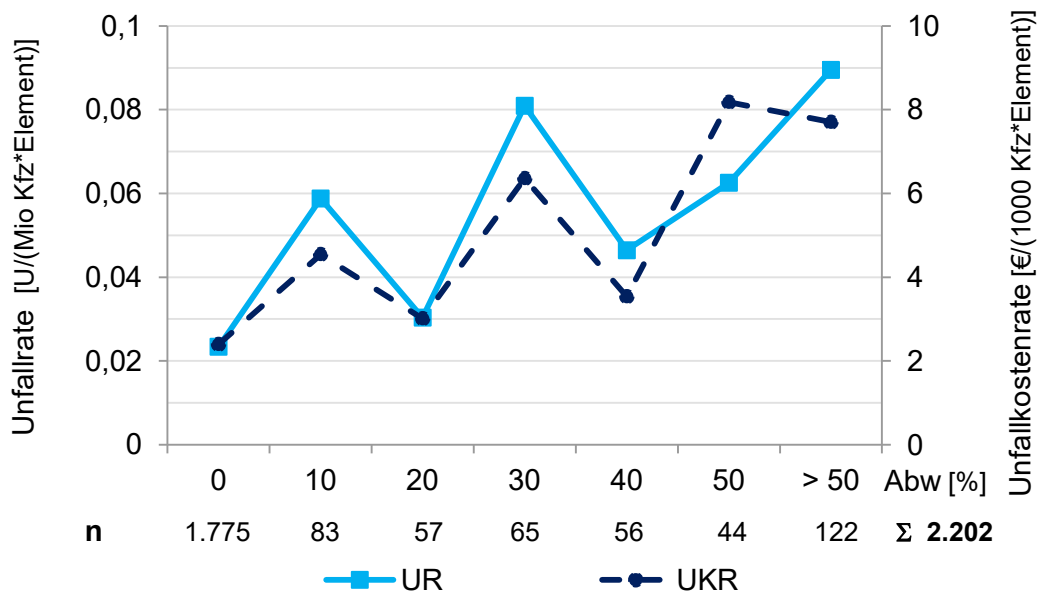


Abb. G-4: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation gegenseitig gekrümmter Kurvenradien (R-R ⇔) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung (Klasse der Fahrbahnbreite 7,00 m bis 8,50 m)

## G.2 Folge gleichsinnig gekrümmter Kurven

### Länge der Kurve $L \geq 50$ m

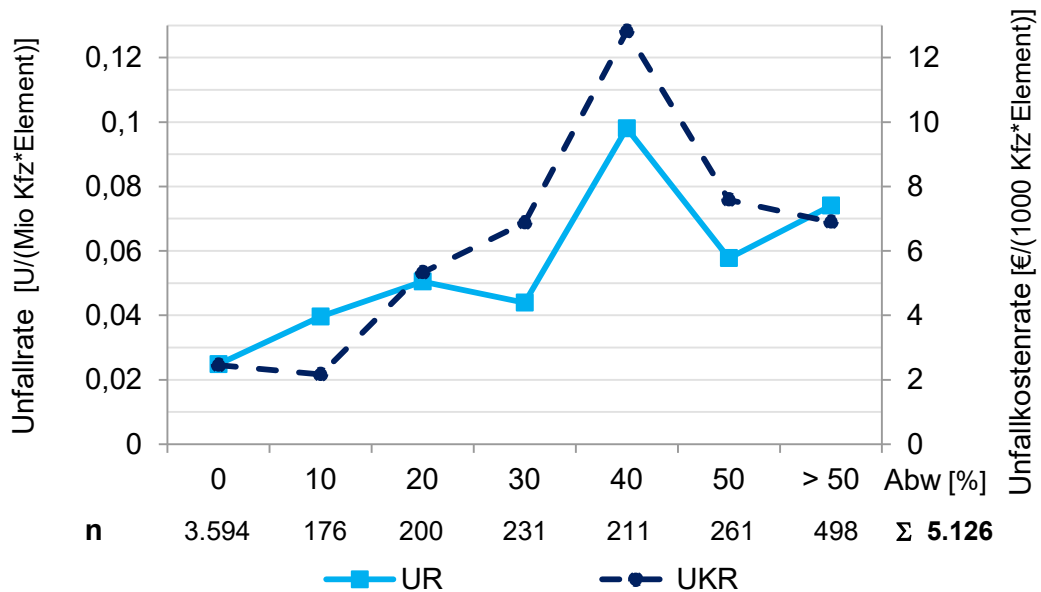


Abb. G-5: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation gleichsinnig gekrümmter Kurvenradien ( $R-R \Rightarrow$ ) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung ( $L_{\text{Kurve}} \geq 50$  m)

### Länge der Kurve $L < 50$ m

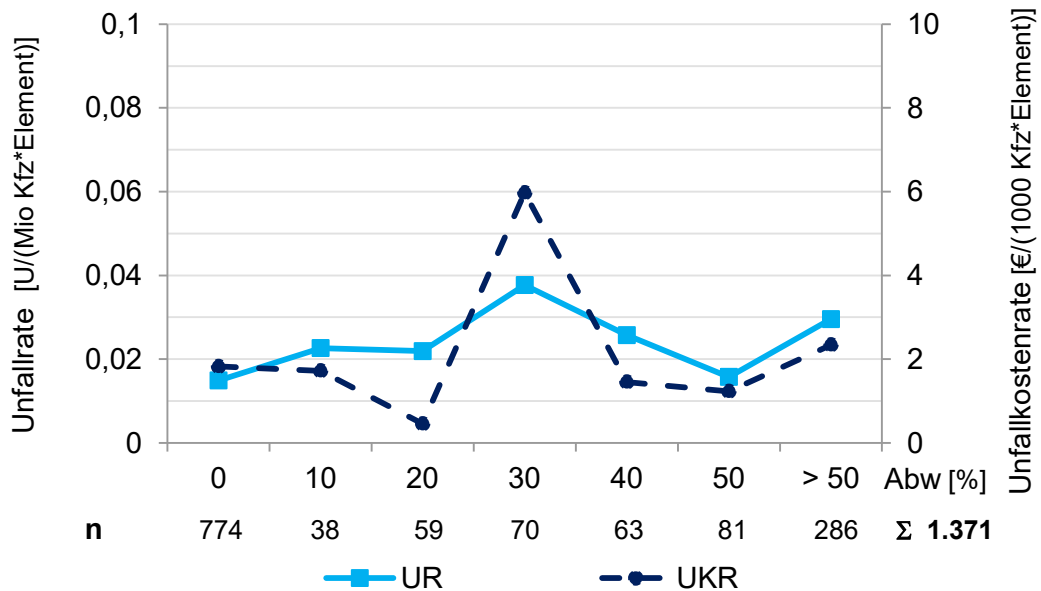


Abb. G-6: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation gleichsinnig gekrümmter Kurvenradien ( $R-R \Rightarrow$ ) in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung ( $L_{\text{Kurve}} < 50$  m)

## Anhang H Unfallauswertungen zu Radien im Anschluss an Geraden

### Streckenkollektiv 2

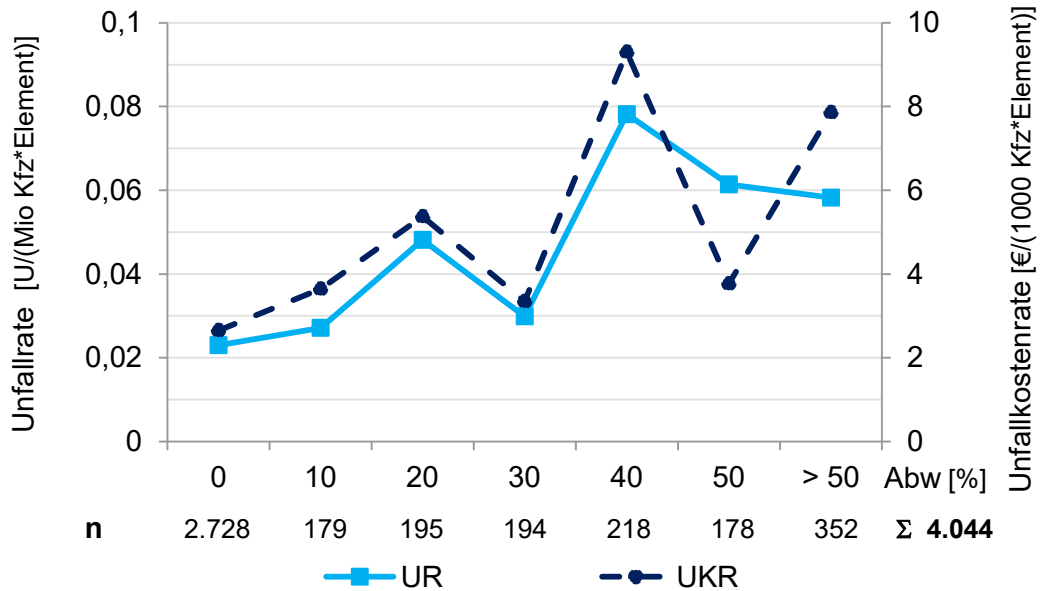


Abb. H-1: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation G-R in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung (Streckenkollektiv 2)

### Länge der Kurve L ≥ 50 m

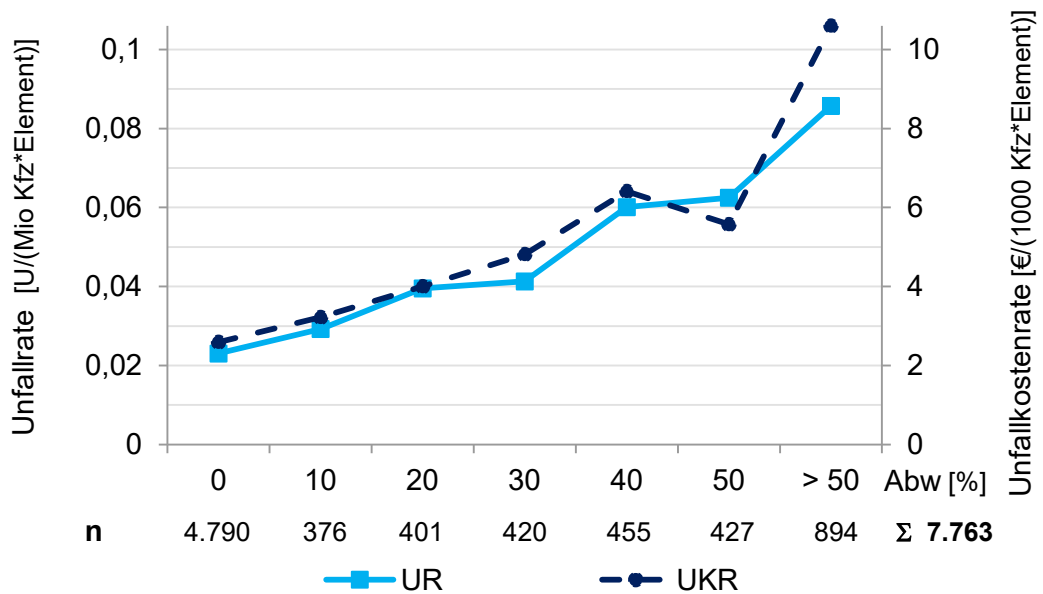


Abb. H-2: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation G-R in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung ( $L_{\text{Kurve}} \geq 50 \text{ m}$ )

**Klasse der Fahrbahnbreite 5,00 m bis 6,50 m**

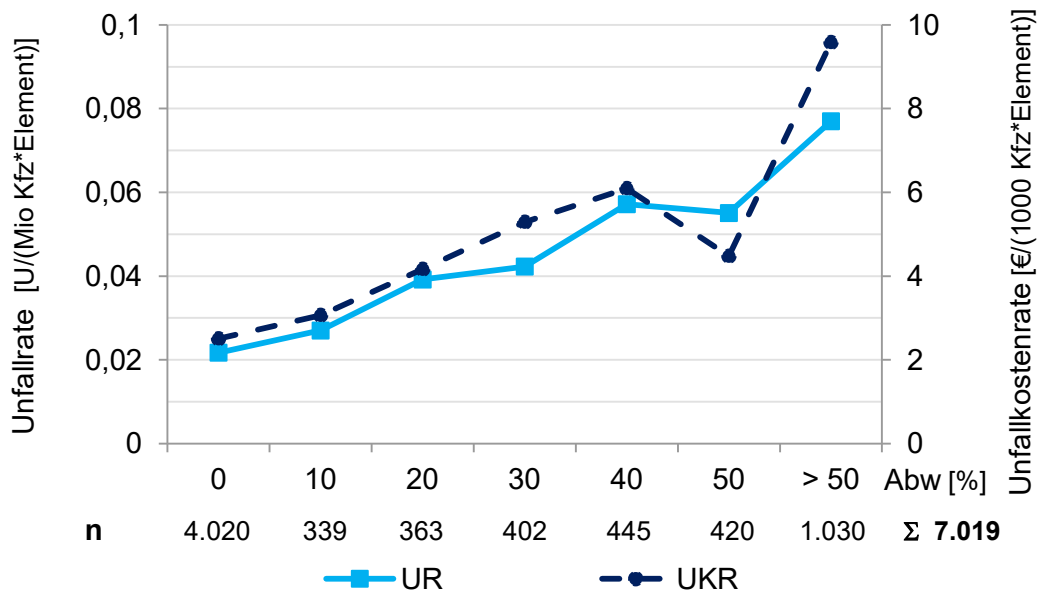


Abb. H-3: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate der Relation G-R in Abhängigkeit vom Maß der Abweichung (Klasse der Fahrbahnbreite 5,00 m bis 6,50 m)



# Anhang I Kurvigkeit des Einzelbogens und Kurvigkeitsdifferenzen

## I.1 Häufigkeitsverteilung

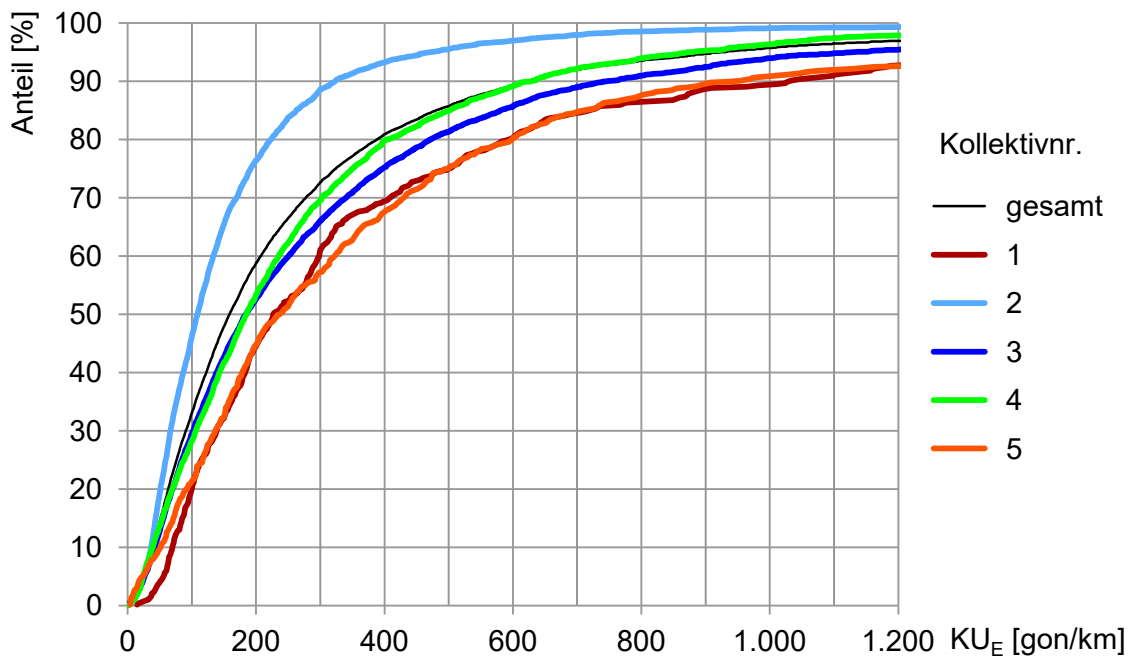


Abb. I-1: Verteilung der Kurvigkeit des Einzelbogens differenziert nach den Streckenkollektiven

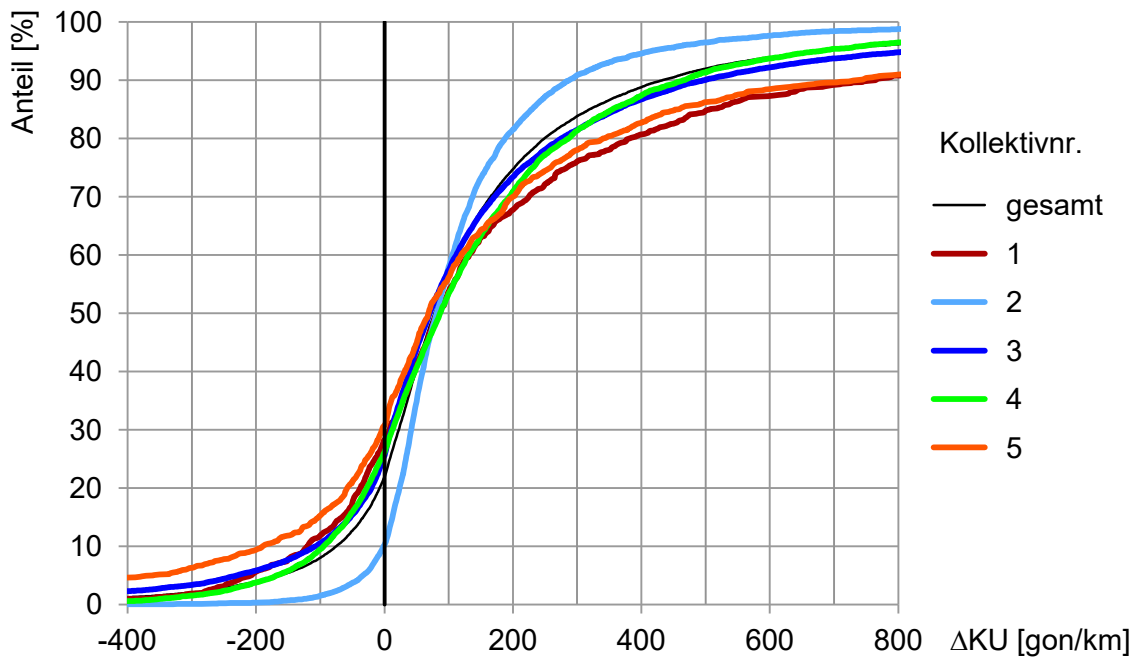


Abb. I-2: Verteilung der Kurvigkeitsdifferenzen differenziert nach den Streckenkollektiven

## 1.2 Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Kurvigkeit des Einzelbogens und der UR/UKR

### Klassifizierung in zwölf Stufen

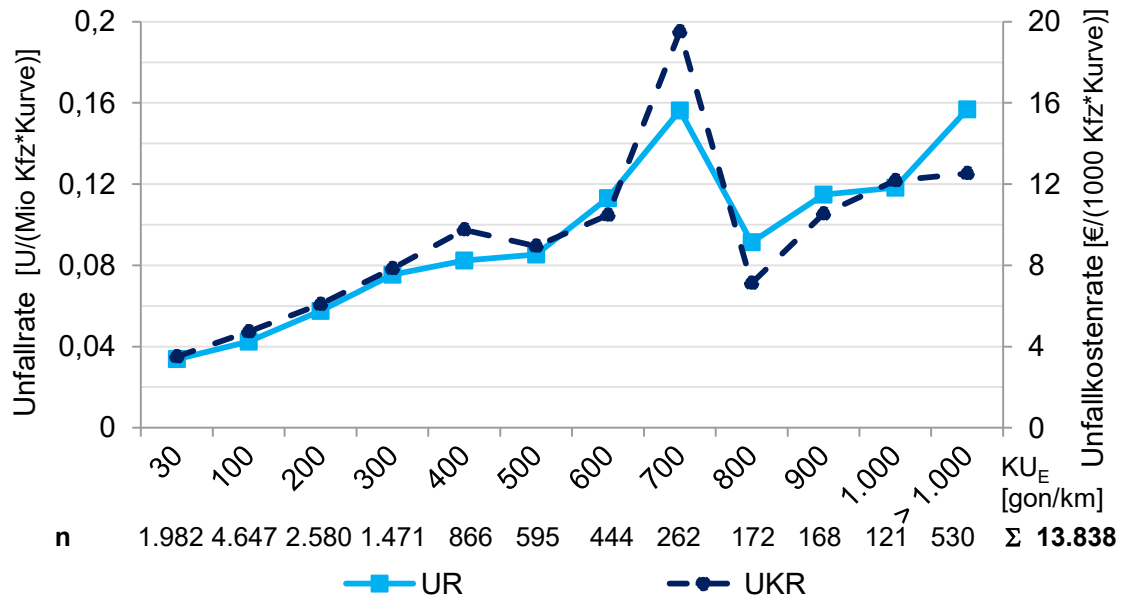


Abb. I-3: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Kurvigkeit des Einzelbogens (unterteilt in zwölf Klassen)

### Länge der Kurve L ≥ 50 m

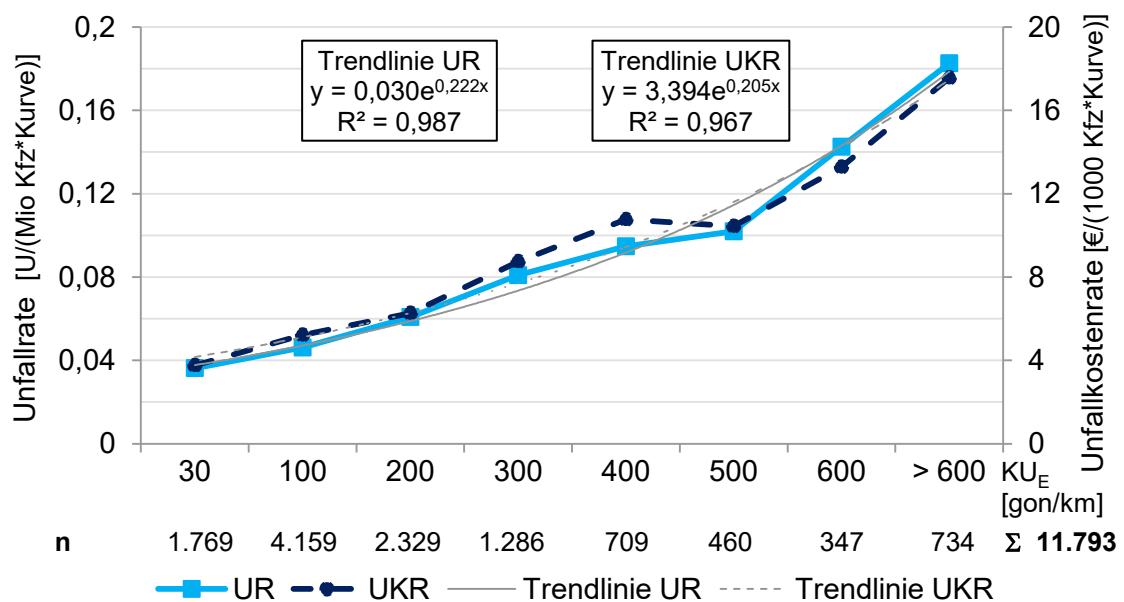


Abb. I-4: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Kurvigkeit des Einzelbogens ( $L_{\text{Kurve}} \geq 50 \text{ m}$ )

**Länge der Kurve L < 50 m**

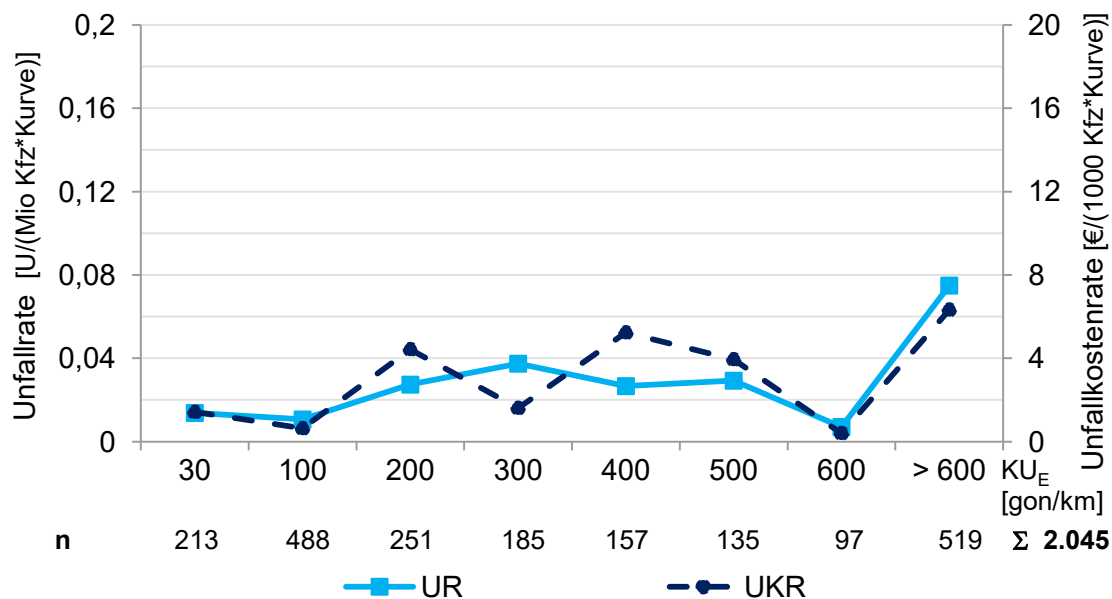


Abb. I-5: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Kurvigkeit des Einzelbogens (L<sub>Kurve</sub> < 50 m)

### 1.3 Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Kurvigkeitdifferenz und der UR/UKR

#### Streckenkollektive 1, 3, 4 und 5

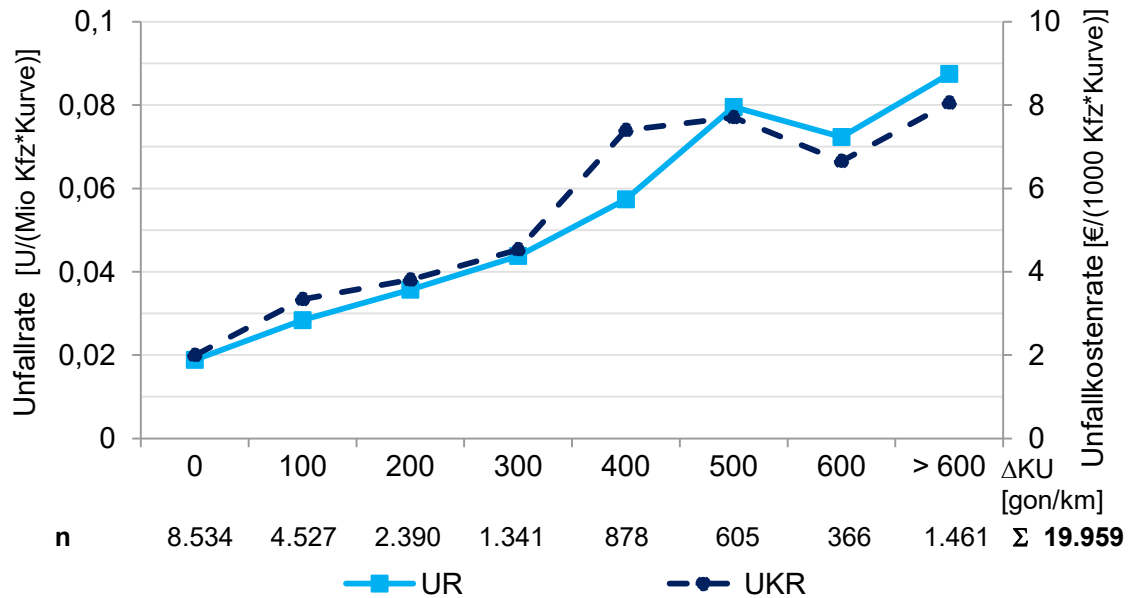


Abb. I-6: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Kurvigkeitdifferenz (Streckenkollektive 1, 3, 4 und 5)

#### Streckenkollektiv 2

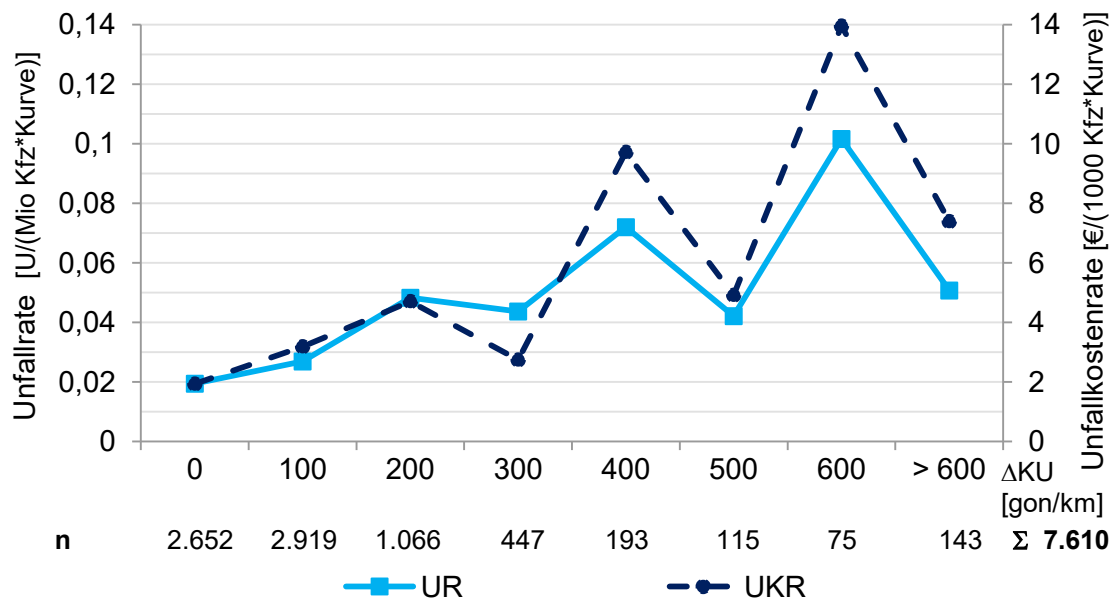


Abb. I-7: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Kurvigkeitdifferenz (Streckenkollektiv 2)

**Klasse der Fahrbahnbreite 5,00 m bis 6,50 m**

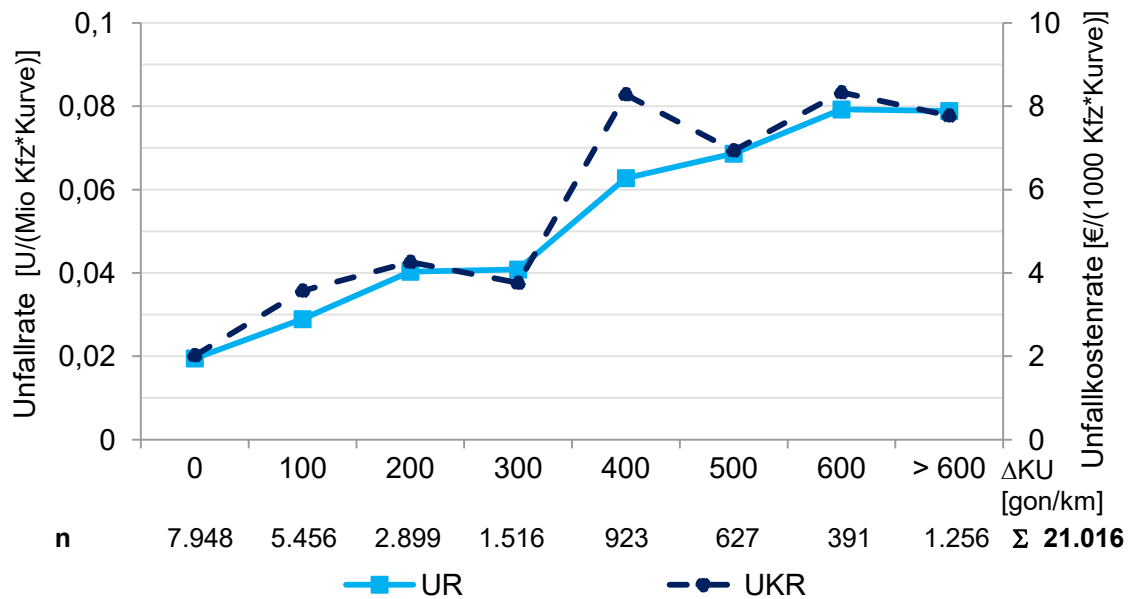


Abb. I-8: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Kurvigkeitdifferenz (Klasse der Fahrbahnbreite 5,00 m bis 6,50 m)

**Klasse der Fahrbahnbreite 7,00 m bis 8,50 m**

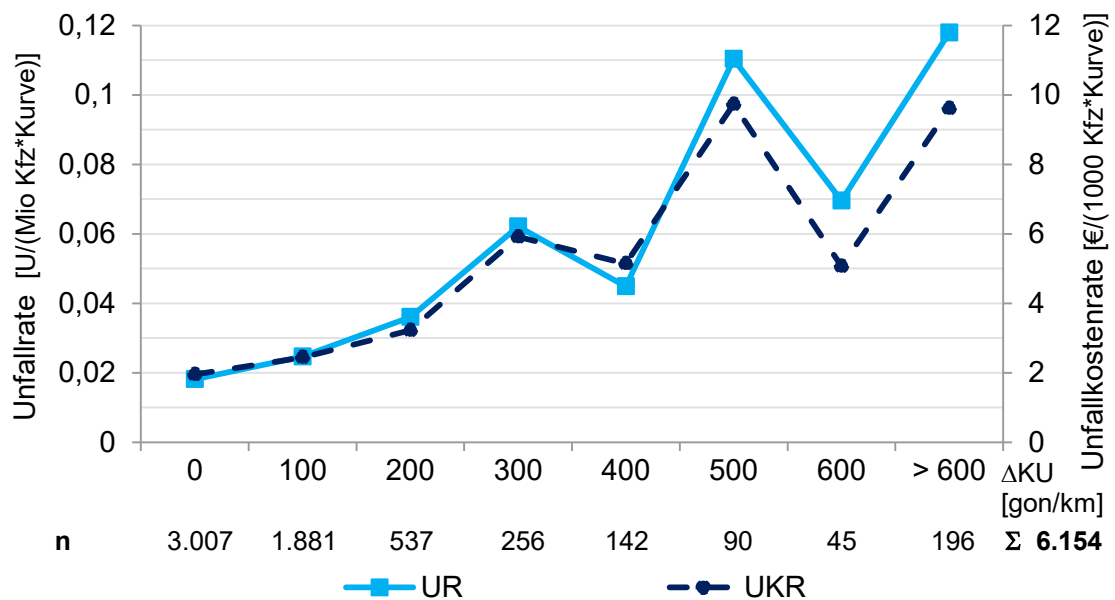


Abb. I-9: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Kurvigkeitdifferenz (Klasse der Fahrbahnbreite 7,00 m bis 8,50 m)

**Länge der Kurve L < 50 m**

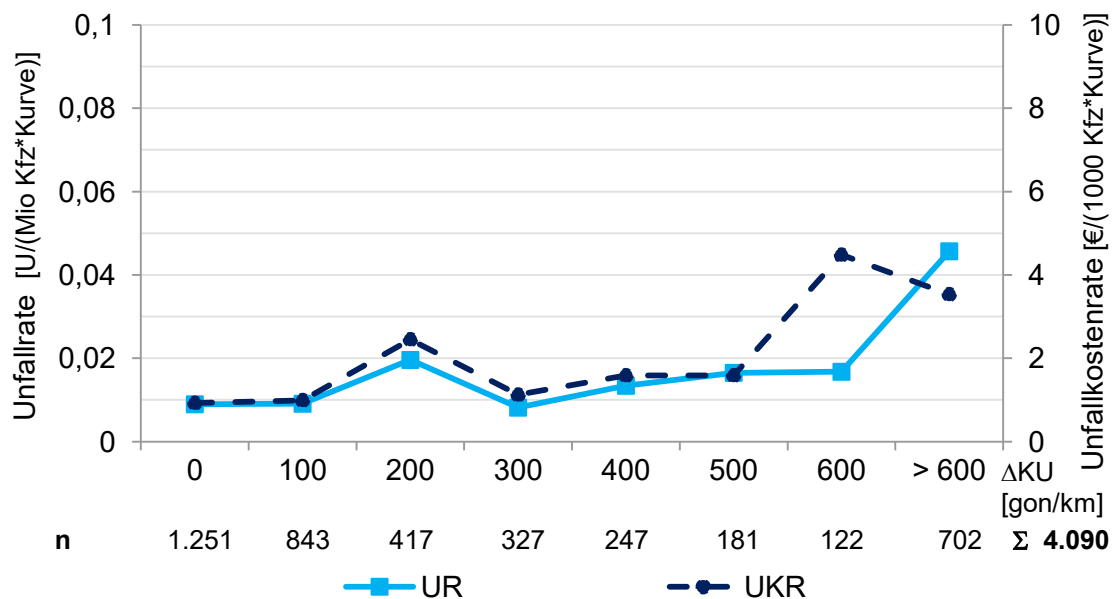


Abb. I-10: mittlere Unfallrate/Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Kurvigkeitdifferenz ( $L_{\text{Kurve}} < 50 \text{ m}$ )

## Anhang J PMS

Tab. J-1: Neue und modifizierte Module für PMS nach KRAUSE/MAERSCHALK (2010)

Nr.	Modul
<b>1</b>	<b>Schnittstelle zur Eingangsdatenübernahme</b>
<b>2</b>	<b>Verkehrs-/Belastungsprognose für kumulierte äquivalente 10-t-Achsübergänge</b>
3	<i>Bildung homogener Abschnitte auf Grundlage der Zustandsgrößen</i>
4	<i>Einbeziehung zusätzlicher Fahrstreifen bei der Abschnittsbildung</i>
<b>5</b>	<b>Ermittlung von Verhaltensklassen und verhaltenshomogenen Gruppen</b>
<b>6</b>	<b>Prognose der Zustandsgrößen</b>
7	<i>Berechnung der maßgebenden Zustandsgrößen für homogene Abschnitte</i>
<b>8</b>	<b>Zustandsbewertung - Normierung und Wertsynthese</b>
<b>9</b>	<b>Berechnung/Prognose des Substanzwertes-Bestand (ZSUB)</b>
<b>10</b>	<b>Mängelanalyse und Schadensursachen</b>
<b>11</b>	<b>Auswahl der Erhaltungsabschnitte</b>
<b>12</b>	<b>Auswahl technisch zulässiger Maßnahmen</b>
<b>13</b>	<b>Berechnung der spezifischen Maßnahmekosten (KBM)</b>
14	Bauliche Unterhaltung: Maßnahmewahl, Kosten, Auswirkungen
15	Um- und Ausbau: Maßnahmewahl, Kosten, Auswirkungen
<b>16</b>	<b>Rücksetzung Zustandsgrößen, Neurechnung ZSUB, Verhalten nach Maßnahme</b>
<b>17</b>	<b>Bewertung der Maßnahmen (ggf. mehrere Untermodule: NKV, FuK)</b>
<b>18</b>	<b>Reihung der Maßnahmen</b>
<b>19</b>	<b>Optimierung von Finanzszenarien, Zustandsentwicklung</b>
<b>20</b>	<b>Optimierung von Qualitätsszenarien, Erhaltungsbedarf</b>
21	Zusammenfassung zum Bauprogramm/Erhaltungsprogramm
<b>22</b>	<b>Schnittstelle zur Datenübergabe/Datenausgabe</b>

### Anmerkung

*kursiv:* zum PMS-I/O redundante Module, welche für die Variante auf Basis der Erfassungsabschnitte zusätzlich in den Ablauf innerhalb des PMS zu integrieren sind

**fett:** zeitnah umzusetzende Module, deren Inhalte bereits praktisch erprobt bzw. mit Forschungsergebnisse untersetzt sind

normal: vorerst zurückgestellte Module

Tab. J-2: Erhaltungsmaßnahmen im PMS (Asphaltbauweise) nach  
KRAUSE/MAERSCHALK (2010)

Kennung	Langtext
<b>Zweibahnige Straßen - Asphaltbauweise</b>	
DBH	Dünnschichtbelag - Heißeinbau
DBK	Dünnschichtbelag - Kalteinbau
DT	Deckschicht - Tiefeinbau
TD	Tiefeinbau Decke (Deck- und Binderschicht)
TG	Tiefeinbau gebundene Befestigung
TO	Tiefeinbau Oberbau
VS	Erneuerung im Hocheinbau auf Asphalt
KS	Kombinierter Einbau, Deckschicht fräsen
KD	Kombinierter Einbau, Deck- und Binderschicht fräsen
<b>Einbahnige Straßen - Asphaltbauweise - freie Strecke</b>	
OB	Oberflächenbehandlung (nur zulässig bei definierten Bauklassen)
DBH	Dünnschichtbelag - Heißeinbau
DBK	Dünnschichtbelag - Kalteinbau
DT	Deckschicht - Tiefeinbau
DH	Deckschicht - Hocheinbau
TD	Tiefeinbau Decke (Deck- und Binderschicht)
TG	Tiefeinbau gebundene Befestigung
TO	Tiefeinbau Oberbau
VS	Erneuerung im Hocheinbau auf Asphalt
KS	Kombinierter Einbau, Deckschicht fräsen
KD	Kombinierter Einbau, Deck- und Binderschicht fräsen
<b>Einbahnige Straßen - Asphaltbauweise/Pflasterbauweise - Ortsdurchfahrt</b>	
OB	Oberflächenbehandlung (nur zulässig bei definierten Bauklassen)
DBH	Dünnschichtbelag - Heißeinbau
DBK	Dünnschichtbelag - Kalteinbau
DT	Deckschicht - Tiefeinbau
TD	Tiefeinbau Decke (Deck- und Binderschicht)
TG	Tiefeinbau gebundene Befestigung
TO	Tiefeinbau Oberbau
UP	Pflaster - Umpflastern mit 25 % Ersatz