

## Modellierung des Fahrverhaltens an Kurven

FA 2.282

Forschungsstelle: Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen (ISE) (Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. R. Roos)

Bearbeiter: Zimmermann, M. / Riffel, S.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: September 2012

### 1 Forschungen zur Modellierung des Fahrverhaltens an Kurven

Im Laufe der letzten Jahrzehnte haben sich die straßenbaulichen Bedingungen (Fahrbahnbreiten, -beläge), die kraftfahrzeugtechnischen Komponenten und das Fahrverhalten der Kraftfahrer wesentlich geändert. Teilweise liegen vertiefende Untersuchungen zum Fahrverhalten in der Annäherung an Kurven und bei der Kurvendurchfahrt mehr als 15 bis 20 Jahre zurück. Die Art der grundlegenden Einflüsse für die Geschwindigkeitswahl und das Fahrverhalten sind vermutlich weitgehend die gleichen, wie sie in früheren Untersuchungen zusammengetragen wurden. Allerdings ist davon auszugehen, dass sich angesichts u. a. modernerer Fahrzeuge und Straßen die Anteile der jeweiligen Einflüsse verschoben haben.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, das Fahrverhalten in Kurven zu modellieren und mit den daraus erlangten Erkenntnissen die bislang dem Regelwerk zugrunde liegenden Festlegungen zu Anfangsbereichen von Kurven und Kurvenfolgen einschließlich zugehöriger Detailfragen wie z. B. zu Klothoidenparametern oder erforderlichen Mindestradien im Anschluss an Geraden systematisch zu hinterfragen. Entsprechend der Hauptzielrichtung der Untersuchung – Landstraßen gemäß RAL (Entwurf 2012) – wurden Landstraßenkurven im unteren Regel- bzw. Mindestradienbereich untersucht.

### 2 Methodik zur Erfassung und Auswertung des Fahrverhaltens an Kurven

Aufbauend auf einer Analyse des nationalen und internationalen Erkenntnisstands zum Fahrverhalten im Annäherungsbereich und Verlauf von Einzelkurven sowie in Kurvenfolgen hinsichtlich relevanter Einflussparameter, folgte eine Analyse internationaler Regelwerke in Bezug auf die in ihnen verankerten Trassierungsfestlegungen.

Zur Vorauswahl von Untersuchungsabschnitten wurde auf Daten der Straßeninformationsbanken (SIB) aus Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz zurückgegriffen. Da der Schwerpunkt der Untersuchung auf dem Fahrverhalten in der Kurvenannäherung sowie dem Beginn der Kurvendurchfahrt lag, wurde nach geeigneten Kombinationen aus vorherigem Element (Kreisbogen, Gerade), einleitender Klothoide sowie dem zu betrachtenden Kreisbogen gefiltert. Weitere Einflussgrößen (Fahrstreifenbreite, Quer- und Längsneigung etc.) wurden nicht vollständig variiert, für diese wurde lediglich gewährleistet, dass das Gesamtkollektiv die angestrebte Verteilung dieser Größen aufwies. Im Fokus der Auswahl standen Landstraßenkurven im unteren Regel- bzw. Mindestradienbereich

( $100 \text{ m} \leq R \leq 900 \text{ m}$ ) der RAL (Entwurf 2012). Nach einem zweistufigen Auswahlverfahren standen 60 theoretische Kombinationen zur Auswahl.

Insgesamt wurden an 68 Einzel- und Kurvenfolgen sowohl die relevanten Trassierungsdaten mittels 3D-Laserscannerverfahren als auch rund 44 000 Videosequenzen relevanter Objekte (Fahrzeuge) durch das am Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen (ISE) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) mit Unterstützung und Mitwirkung von Partnern (Robert Bosch GmbH, Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB)) erarbeitete Messsystem erfasst. Das Messsystem vereint in sich die Vorzüge einer Querschnittsmessung (sehr großes Datenkollektiv, hohe Genauigkeit) mit denen einer Fahrzeugverfolgung (Erlangung von Informationen entlang des Fahrzeugwegs (Längsschnittmessung)). Darüber hinaus lassen sich mit diesem Messsystem die Nachteile üblicher Querschnittsmessungen (Ermittlung von Ergebnissen lediglich an wenigen Stützstellen) wie auch Verfolgungsfahrten (sehr hoher Erhebungsaufwand bei geringem Datenkollektiv) weitgehend ausmerzen. Die Erfassungsreichweite liegt bei max. 160 m. Träger der Messtechnik sind Leitpfosten, die für eine vollständig unbeeinflusste Erfassung sorgen. Die Wahl des Leitpfostenstandorts wurde in der Regel so gewählt, dass ein Fahrzeug im Annäherungsbereich bis zum Drittelpunkt des Hauptbogens hinein beobachtet werden konnte. Insgesamt standen drei Messsysteme zur Verfügung. Die Messrichtung verläuft entgegen der Fahrtrichtung, demnach werden sich annähernde Fahrzeuge erfasst.

Um die Fahrverläufe (Trajektorien) in Bezug zum Straßenverlauf auswerten zu können, wurden diese mit den Trassierungsdaten überlagert und anschließend die Spurlagen sowie Geschwindigkeiten mittels 3D-objektorientierter Bildauswertung ausgewertet bzw. geschätzt. Der Vergleich der geschätzten Fahrzeugtrajektorien mit den "wahren" Fahrlinien ergab nach ggf. händischer Korrektur maximale Abweichungen von  $\leq 15 \text{ cm}$ . Der Vergleich der geschätzten mit den tatsächlichen Geschwindigkeiten ergab Differenzen von  $\leq 1 \text{ km/h}$ .

Insgesamt wurden rund 7 050 Trajektorien frei fahrender Fahrzeuge (Nettozeitlücke  $t \geq 7 \text{ s}$  zum vorausfahrenden und  $t \geq 4 \text{ s}$  zum folgenden Fahrzeug sowie Ausschluss von Gegenverkehr) ausgewertet.

Basierend auf den einzelnen Fahrverläufen (Trajektorien), dem Spurverhalten und den Geschwindigkeitsprofilen wurde das Fahrverhalten bezogen auf das 50. Perzentil der Fahrverläufe (Fahrzeugmitte) an zehn beschreibenden Stützstellenpunkten modelliert. Das 50. Perzentil bietet sich insbesondere wegen des je nach Fahrstreifenbreite verfügbaren Spielraums innerhalb des Querschnitts an und entspricht der Fahrlinie, die von 50 % der betrachteten Fahrer eingehalten wurde.

Zur Auswertung des Spurverhaltens wurden ausschließlich die seitlichen Auslenkungen am Beginn der einleitenden Klothoide, der Punkt mit der maximalen Abweichung von der Fahrstreifenmitte nach dem Klothoidenbeginn, der Radiusanfang und der Punkt mit der maximalen Abweichung von der Fahrstreifenmitte nach dem Radiusanfang bezogen auf die Fahrstreifenmitte (resp. Fahrstreifenbreite) herangezogen. Im

Fokus der Untersuchung standen insbesondere Abschnitte, bei denen wegen zunehmender Lageplankrümmungen davon auszugehen war, dass sich Änderungen in den Geschwindigkeiten eher durch Geschwindigkeitsreduktionen als durch -zunahmen charakterisieren lassen. Die Stützstellen der Perzentilgeschwindigkeiten ( $V_{15}$ ,  $V_{50}$ ,  $V_{85}$ ) befanden sich an den definierten Stützstellen für die Spuranalyse.

Die Systematik zur Analyse der Modelllinien sah vor allem aufgrund sicherheitsrelevanter Aspekte (Abstand zum Gegenfahrstreifen bzw. Fahrbahnrand) die Unterteilung des Fahrstreifens in Bezug zur Fahrstreifenmitte vor. Unabhängig von der Fahrstreifenbreite wurde ein Ideallinienbereich  $\pm 0,25$  m um die Fahrstreifenmitte festgelegt, in dem der Fahrer den größtmöglichen Abstand sowohl zum Gegenfahrstreifen als auch zum rechten Fahrstreifen- bzw. Fahrbahnrand besitzt. An den Idealbereich schließt sich der Toleranzbereich an, der abhängig von der Fahrstreifenbreite ist. Dieser gewährt dem Fahrer bei entsprechender Fahrstreifenbreite einen größeren Spielraum bei der Einhaltung der Ideallinie. Bei schmalen Fahrstreifen tendiert dieser Bereich gegen null.

Der Gefährdungsbereich liegt jeweils neben dem Toleranzbereich, bei schmalen Fahrstreifen direkt neben dem Ideallinienbereich und besitzt einen festen Abstand von 1,00 m (halbe Fahrzeugbreite) zur Leitlinie. Überfährt somit das Fahrzeug (Fahrzeugmitte) den Gefährdungsbereich, befindet sich das Fahrzeug im Konfliktbereich, d. h., die linke Fahrzeugaußenkante tangiert die Leitlinie oder hat diese bereits überfahren. In Richtung rechter Fahrbahnrandbegrenzung entspricht dies dem Abkommensbereich, in dem das Fahrzeug sich immer weiter dem Fahrbahnrand nähert.

Gestützt durch Informationen aus Probandenfahrten, um auch Aspekte des menschlichen Verhaltens mit in die Untersuchung einfließen zu lassen, wurden die Modellierungsstützstellenwerte unterschiedlichen Größen bzw. Parametern gegenübergestellt bzw. untereinander variiert.

### 3 Ergebnisse der Modellierung

Die Modellierungsergebnisse wurden bezogen auf relevante Größen bzw. Parameter hinsichtlich eines Einflusses auf das Spur- bzw. Fahrverhalten überprüft.

#### 3.1 Radiusparameter

Allgemein wurde festgestellt, dass bei Radien  $R > 350$  m in Wendelinien eine ausgeprägte Fahrlinie zu erkennen ist. So fahren die Verkehrsteilnehmer meist bei Ausfahrt aus einem Rechtsbogen tendenziell rechtsversetzt und wechseln im weiteren Verlauf mehr oder weniger auf Höhe des Wendepunkts nach links, um die folgende Linkskurve zu durchfahren. Bei einer Links-/Rechts-Kurve fallen die Fahrverläufe entsprechend gespiegelt aus. Bei geradem Annäherungsbereich weisen die Fahrlinien überwiegend einen leicht linksversetzten, parallelen Verlauf zur Fahrstreifenmitte auf. Im Kurvenbereich weicht dieser, je nach Kurvenrichtung und Radius, mehr oder weniger stark von der Ideallinie bzw. vom Idealbereich ab. Je größer die Radien ( $R > 350$  m) und je breiter der Fahrstreifen, umso weniger weisen die Fahrverläufe Abweichungen von der

Ideallinie bzw. -bereich auf. Relativ schmale Fahrstreifen ( $< 3,00$  m) in Verbindung mit kleinen Radien führen hingegen meist zum Schneiden der Kurve. Gesamtbetrachtet wurde deutlich, dass die Verkehrsteilnehmer in Abhängigkeit der Fahrstreifenbreite größere Toleranzen bei der Spurwahl bzw. Fahrlinie gegenüber der Fahrstreifenmitte zulassen.

#### 3.2 Radiuslänge

Insgesamt war festzustellen, dass bei Linkskurven sowie entsprechend (kurzer) Radiuslänge ( $LR \leq 100$  bis  $150$  m) und damit verbundener guter Sicht auf den vorausliegenden Kurvenbereich tendenziell die Kurve geschnitten wurde. Bei größeren Radiuslängen näherten sich die Fahrspuren tendenziell dem Idealbereich bzw. der Ideallinie.

#### 3.3 Verhältnis "L/R"

Bei gleicher Fahrstreifenbreite und vergleichbarem Verhältnis zwischen Radius und Radiuslänge ("L/R") traten ähnliche Spurlagen auf. Ferner lagen die Spurlagen verschiedener Fahrstreifenbreiten auf vergleichbarem Niveau. Zusammenfassend wies das Verhältnis "L/R" einen schlechteren Zusammenhang mit der resultierenden Spurlage auf als die absolute Radienlänge.

#### 3.4 Klothoidenparameter, Klothoidenlänge und Verhältnis "A/R"

Bezogen auf den Klothoidenparameter (A) oder die Länge der einleitenden Klothoide (LA) konnte kein signifikanter Zusammenhang zur Spurlage festgestellt werden. Eine tendenziell leicht ungünstige Kombination stellten minimale Klothoidenparameter (einhergehend mit relativ kurzen Klothoidenlängen) in Verbindung mit kleinen Radien dar. Bezüglich der Klothoidenlänge war bei allen Elementfolgen der Trend zu erkennen, dass unabhängig von der Fahrstreifenbreite umso mehr der Idealbereich angesteuert wurde, je länger die Klothoide war.

Auch die Betrachtung des Verhältnisses Klothoidenparameter zu Radiusparameter ("A/R") ließ keinen signifikanten Einfluss auf die gewählte Fahrspur erkennen. Allerdings wurde auch hier deutlich, dass bei Rechtskurven die Spurlagen am Wendepunkt ausnahmslos links versetzt zur Fahrstreifenmitte lagen. Im Gegensatz zu Linkskurven, bei denen die Spurlagen zwischen  $-0,50$  und  $0,50$  m schwanken. Während sich bei Rechtskurven die einzelnen Spurlagen um die Fahrstreifenmitte orientieren, lagen diese bei Linkskurven ausschließlich im Bereich Richtung Gegenfahrstreifen.

#### 3.5 Verhältnis "A/A<sub>v</sub>"

Das Verhältnis zwischen der einleitenden Klothoide des untersuchten Radius und der ausleitenden Klothoide des vorherigen Elements ("A/A<sub>v</sub>") ließ keine Zusammenhänge zwischen der Spurlage und dem Klothoidenverhältnis erkennen.

## 3.6 Verhältnis "R/R<sub>v</sub>"

Aus der Betrachtung des Verhältnisses zwischen vorherigem und untersuchtem Radiusparameter ("R/R<sub>v</sub>") konnte bezüglich der Spurlagen kein eindeutiger Zusammenhang erkannt werden. Dennoch wiesen die Spurlagen Charakteristika auf. So lagen diese bei  $R/R_v < 1$  tendenziell bei Links-/Rechtskurven weiter links versetzt zur Fahrstreifenmitte als bei einem Verhältnis  $> 1$ .

Bei Links-/Rechtskurven tendierten die Fahrlinien bei  $R/R_v > 1$  etwas weniger stark Richtung Idealbereich bzw. Ideallinie als bei Rechts-/Linkskurven, was ebenso auf das tendenzielle Schneiden von Linkskurven hindeutet. Somit kann bezüglich der Vorgaben im Regelwerk (RAS-L, 1995 und RAL, Entwurf 2012) geschlossen werden, dass die grundlegende Vorgehensweise der Relationstrassierung zu einem relativ harmonischen Spurverhalten führt und somit prinzipiell bestätigt werden kann.

Bei Links-/Rechtskurven scheint die Spurlage im Wendepunkt sowie am Radiusbeginn bzw. im Radius stark durch den vorherigen Radius geprägt zu werden. Bei Rechts-/Linkskurven scheint im Gegensatz dazu der nachfolgende Radius die Spurwahl stärker zu beeinflussen. In vier untersuchten Linkskurvenbereichen lag eine Fahrstreifenbegrenzung (Z 295 nach StVO) vor. Jedoch scheint diese nicht grundsätzlich beachtet zu werden oder eine Wirkung auf die Spurwahl zu haben.

## 3.7 Einfluss der Geschwindigkeit

Die Spurlagen in Bezug zur V<sub>50</sub>-Geschwindigkeit ließen weder bei Links- noch bei Rechtskurven einen deutlichen Zusammenhang erkennen. Die Annahme, dass insbesondere bei Linkskurven ein Schneiden der Kurve meist mit einer höheren Geschwindigkeit verbunden ist, konnte auf Basis der V<sub>50</sub>-Geschwindigkeit nicht bestätigt werden. Die Verkehrsteilnehmer hielten überwiegend die zulässige Höchstgeschwindigkeit ein. Geschwindigkeitsbeschränkungen wurden um bis zu 10 km/h überschritten.

Insgesamt konnte ab Radien  $R > 300$  m keine (signifikante) Abnahme der Geschwindigkeit festgestellt werden. Die Geschwindigkeitsabnahmen von 5 bis 10 km/h bei  $R < 300$  m deuten auf eine relativ moderate Geschwindigkeitswahl hin. Ferner traten bei einem Verhältnis  $R/R_v \leq 1$  tendenziell Geschwindigkeitsreduktionen von bis zu  $\leq 10$  km/h und bei  $R/R_v > 1$  eher Geschwindigkeitszunahmen auf.

Im Geradenbereich lagen die Geschwindigkeiten tendenziell wesentlich höher als sie im folgenden Kurvenbereich sein sollten. Bei Linkskurven mit vorherigem Geradenbereich waren bei Radien  $R < 300$  m vereinzelt Geschwindigkeitsabnahmen von bis zu 15 km/h zu verzeichnen; bei  $R > 300$  m lagen die Geschwindigkeitsanpassungen auf vergleichbarem Niveau wie bei Links-/Rechtskurven.

Die Spurlagen in Bezug zur V<sub>85</sub>-Geschwindigkeit am Radiusanfang lagen bei Linkskurven mit zunehmender Geschwindigkeit weiter links. Bei gleichen Radien und zunehmender Geschwindigkeit tendierten die Spurpunkte Richtung Gegenfahrstreifen, d. h., zum Kurvenschneiden. Weiterhin war ein deutlicher Zu-

sammenhang zwischen zunehmendem Radius und zunehmender Geschwindigkeit erkennbar. Im Vergleich hierzu war diese Abhängigkeit zwischen der Spurlage und der V<sub>85</sub>-Geschwindigkeit bei Rechtskurven ebenfalls erkennbar, wenngleich die Spurlagen sich eher rechtsversetzt zur Ideallinie bewegten. Jedoch zeigten Rechtskurven keine eindeutige Abhängigkeit der Spurlage von Radius und Geschwindigkeit.

Sowohl für Links- als auch Rechtskurven konnte festgestellt werden, dass die Spurlagen umso weiter links bzw. rechts lagen, je höher die Eintrittsgeschwindigkeit am Beginn des Kurven- bzw. im Ausfahrbereich des vorherigen Elements war.

Die Geschwindigkeit bei Linkskurven wies überdies keine Abhängigkeiten von der Fahrstreifenbreite auf. Bei Rechtskurven, Fahrstreifenbreiten  $< 3,00$  m und Radien  $R \leq 200$  m zeigte sich, dass die Geschwindigkeiten im Vergleich zur entsprechenden Annahme in den RAS-L (1995) bei Fahrbahnbreiten  $\leq 6,00$  m relativ gut übereinstimmten. Auch bei Fahrstreifenbreiten  $> 3,00$  m (Fahrbahnbreite  $\geq 6,50$  m) stimmten die erhobenen Geschwindigkeiten mit den Annahmen relativ gut überein.

## 4 Zusammenfassung und Empfehlungen

Im Rahmen des FE-Vorhabens wurde basierend auf den Daten der Straßeninformationsbanken der Bundesländer Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz (SIB) zunächst eine Systematik zur Vorauswahl von Untersuchungsabschnitten entwickelt. Anhand relevanter Parameter und unter Berücksichtigung möglichst breiter Variation wurden zunächst 60 in Frage kommende theoretische Kombinationen ausgewählt und an 68 Abschnitten (40 Kombinationen) die Fahrverläufe von frei fahrenden Fahrzeugen erfasst und ausgewertet. Die breite Variation der Kombinationen und Parameter führte allerdings zu erheblichen Streuungen der Daten. Ferner erschwerten aber auch die Berücksichtigung etlicher Parameter das Erkennen von Zusammenhängen und demzufolge auch das Ableiten gewünschter Abgrenzungen. Die Erwartung, dass die nach Regelwerk ungenügenden Radienfolgen auch zu deutlich ungünstigerem Fahrverhalten führen würden, wurde nicht eindeutig bestätigt. Sowohl was die Fahrlinien als auch die Geschwindigkeitsverläufe betrifft, fahren die Verkehrsteilnehmer deutlich angemessener als erwartet.

Insgesamt werden die Fahrlinien von der Kurvenkombination beeinflusst. Bei Links-/Rechtskurven war die Fahrspur tendenziell am Klothoidenwendepunkt sowie im Radius stärker durch die Spurposition im vorherigen Radius geprägt. Bei Rechts-/Linkskurven dominierte tendenziell der folgende Radius die Fahrspuren. Die Tendenz zum Kurvenschneiden (insbesondere Linkskurven) war bei größeren Radien, Radienlängen und Fahrstreifenbreiten jeweils abnehmend. Als maßgebende Faktoren für die Fahrspurwahl haben sich der Radius (R), die Radiuslänge (LR) und die Fahrstreifenbreite (FSB) erwiesen.

Die Ergebnisse zeigten, dass sich zum einen kleine Radien in Verbindung mit kurzen Radienlängen insbesondere bei Linkskurven und Fahrstreifenbreiten  $< 3,00$  m ungünstig auf die Spurwahl auswirkten. Relativ kurze Radienlängen  $LR \leq 100$  bis 150 m sollten somit vor allem bei Fahrstreifenbreiten  $< 3,00$  m vermieden werden, um das Kurvenschneiden nicht zu begünstigen. Weiterhin ist davon auszugehen, dass bei Fahrstreifenbreiten  $> 3,00$  m diese Abweichungen jedoch aus ver-

kehrssicherheitstechnischen Gesichtspunkten als unkritisch zu bewerten sind. Dies gilt umso mehr für die Regelfahrstreifenbreite nach RAL (Entwurf 2012) für die EKL 1 bis 3 von 3,50 m.

Zum anderen wirkten sich auch kurze Klothoidenlängen ( $\leq 50$  m) bei entsprechend schmalen Fahrstreifen negativ auf das Fahrverhalten aus. Die insgesamt nicht in Frage stehende Untergrenze des Klothoidenparameters bei R/3 könnte allerdings durch eine Empfehlung ergänzt werden, dass gleichzeitig ein Mindestklothoidenparameter  $\min_A = 100$  m anzustreben ist. Da nach RAL (Entwurf 2012) Radien unter  $R = 300$  m nur in der EKL 4 anzuwenden sind, könnte so gerade für diese schmalen Straßen eine vorteilhafte Linienführung erreicht werden.

Insbesondere die Betrachtung der Spurlagen in Bezug zu den Radien verdeutlichte, dass die bisher angewendete Radienrelation auch in der Praxis zu einem relativ harmonischen Spur- sowie Geschwindigkeitsverhalten führt. So zeigte sich auch, dass zwischen den Geschwindigkeiten im vorhergehenden sowie im betrachteten Radius die Geschwindigkeitsabnahmen relativ moderat ausfallen. Ferner ist das Geschwindigkeitsniveau bei der Elementfolge Rechts-/Linkskurve bzw. Links-/Rechtskurve wesentlich ausgeglichener und harmonischer als bei der Elementfolge Gerade/Links- bzw. Rechtskurve.

Demzufolge kann die bisher angewendete Trassierung gemäß Radienrelationen als zweckmäßig angesehen werden und sollte bei Planungen (Neu-, Um- und Ausbau) generell Anwendung finden. Um jedoch höhere Geschwindigkeiten aufgrund eines größeren vorhergehenden Radius bei Einfahrt in den folgenden Kurvenbereich zu vermeiden, sollten sich die Radien gemäß Radientulpe (RAL, Entwurf 2012) im "guten Bereich" bewegen.

Während hingegen bei Rechtskurven aus Geraden heraus das Schneiden der Kurve nach innen tendenziell seltener erfolgte, trat dies bei Linkskurven wesentlich öfter auf. Insbesondere in Verbindung mit den zum Teil höheren Geschwindigkeiten, die aus dem Geradenbereich resultieren, waren überwiegend kritische Fahrverläufe zu verzeichnen. Auch wenn im Rahmen der Untersuchung die Wirkung einer Fahrstreifenbegrenzung im Kurvenbereich nicht nachgewiesen werden konnte, so scheint es doch empfehlenswert, vor allem bei engen Kurven (ggf. in Verbindung mit kurzen Radienlängen) eine profilierte Fahrstreifenbegrenzung aufzubringen.

Im Rahmen des FE-Vorhabens wurde nicht explizit der Einfluss der Geradenlänge auf die Geschwindigkeit untersucht, jedoch sollten zu lange Geraden vermieden werden, um zu hohe (nicht angepasste) Geschwindigkeiten auf den folgenden Kurvenbereich zu vermeiden. Die Sinnhaftigkeit der in der RAL (Entwurf 2012) formulierten relativ strengen Anforderungen an Radien im Anschluss an Geraden bestätigte sich auch hier: vor allem Radien  $\leq 200$  m führten insbesondere in Linkskurven zu kritischen Spurlagen und abrupten Geschwindigkeitsanpassungen. Die Verkehrsteilnehmer hielten überwiegend die zulässige Höchstgeschwindigkeit ein; Geschwindigkeitsbeschränkungen wurden nur bis zu 10 km/h überschritten.

Die große Spannweite der untersuchten Parameter und Kombinationen führten dazu, dass lediglich Tendenzen der Spurwahl

abgeleitet werden konnten. Um für die Planung konkrete Empfehlungen geben zu können, sind weitere vertiefende Untersuchungen an einem begrenzten und aussagekräftigen Kollektiv erforderlich. Anhand der oben aufgeführten Ergebnisse sowie bisheriger Ergebnisse kann ab  $R > 350$  m von einem unkritischen Spurverhalten ausgegangen werden. Darunter und in Abhängigkeit der Fahrstreifenbreite sollten weitere Untersuchungen zu den Einflüssen der Spurwahl durch z. B. die Länge der Geraden vor einem Kurvenbereich, dem Radius und der Radienlänge oder durch Fahrstreifenbegrenzungen durchgeführt werden.

Um die Frage, ob insbesondere kurze Klothoidenlängen bzw. kleine Klothoidenparameter sich negativ auf das Fahrverhalten auswirken, sollte vor allem bei Linkskurven diese Thematik nochmals vertiefend hinterfragt werden.

Bei den Parametern  $L/R$ ,  $A/R$ ,  $A$ ,  $A/A_v$ ,  $LA$  sowie  $R/R_v$  konnte kein systematischer Einfluss auf die Fahrspur erkannt werden. Zumindest bezüglich des Klothoidenparameters waren bei schmalen Fahrstreifen, minimaler Klothoidenparameter und -längen in Verbindung mit kleinen Radien leicht ungünstigere Einflüsse erkennbar.

Die Notwendigkeit von Anpassungen der Grenzwerte für Klothoiden ( $A$ ) konnte nicht generell gesehen werden. Insbesondere bei den Parametern, die bei den Entwurfsklassen EKL 1 bis 3 zur Anwendung kommen, besteht dafür keine Notwendigkeit. Bei Fahrstreifenbreiten  $\leq 3,00$  m und  $R < 300$  m war jedoch erkennbar, dass Klothoidenlängen von 50 m nicht unterschritten werden sollten. Um diesen unteren Wert der Wirksamkeit einer Klothoide zu erreichen, wurde in den Entwurf der RAL die Formulierung "Klothoidenparameter  $A < 100$  m sollten möglichst vermieden werden" eingebracht. Durch den mathematischen Zusammenhang von Klothoidenparameter und -länge sowie dem Radius des zugehörigen Kreisbogens wird somit zumindest für besonders kritische Kombinationen im unteren Radienbereich ( $R < 200$  m) für Straßen der Entwurfsklasse EKL 4 eine entsprechende Mindestlänge von 50 m erreicht.