

## Verwendung des Wendekreisdurchmessers in der Unfallrekonstruktion – Teil 2

von Dipl.-Ing. Robert Dietrich, Münster\*

Fortsetzung aus VRR 2012, 457 ff.

*Im Rahmen der Unfallrekonstruktion ist es von Vorteil, möglichst viele bekannte Parameter einbringen zu können. Mit dem Wendekreisdurchmesser ist ein fahrzeugabhängiger Grenzwert vorhanden. Oft werden in Aussagen die eigenen oder die Fahrvorgänge des Unfallgegners beschrieben. Hier ist es wichtig, die Bewegungsbahn eines Fahrzeugs möglichst eng eingrenzen zu können. Der notwendige Wendekreisdurchmesser kann also darüber entscheiden, ob sich die von den Parteien vorgetragenen Fahrvorgänge im Bereich des technisch Möglichen befinden oder nicht und spielt somit in der Rekonstruktion von Verkehrsunfällen, bei denen Wende- bzw. Abbiegevorgänge eine Rolle spielen, eine wichtige Rolle.*

*Im vorangegangenen Teil I (VRR 2012, 457 ff.) wurden die Genauigkeiten der durch den Hersteller angegebenen Werte für die Wendekreise untersucht. Fahrversuche mit verschiedenen Fahrzeugen bei geringeren Geschwindigkeiten von 6 – 8 km/h führten zu dem Ergebnis, dass bei quasistatischen Fahrvorgängen die Herstellerangaben sehr genau reproduzierbar sind. D.h., dass diese Angaben für Überlegungen in der Unfallrekonstruktion direkt übernommen werden können. Aufgrund der veränderten Fahrdynamik bei schnellerer Kurvenfahrt wurden in dieser Arbeit die Auswirkungen der Fahrgeschwindigkeit auf den Wendekreis untersucht.*

\* Der Autor ist Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle im Ingenieurbüro Schimmelpfennig + Becke, Münster.

## I. Grundlagen

Zur Verdeutlichung der Vorüberlegungen zu den durchgeführten Versuchen und zum besseren Verständnis der Materie wird im Folgenden eine kurze Erläuterung der Fahrdynamik bei Kurvenfahrt eines Fahrzeugs eingefügt.

Wie bereits im ersten Teil der Arbeit wird auch hier auf ein Ein-Spur-Modell zur Erklärung der relevanten Theorie zurückgegriffen, vgl. Abb. 1. Trotz der Vereinfachung in diesem Modell ist es geeignet, um die grundsätzlichen Zusammenhänge der Fahrdynamik zu erläutern.

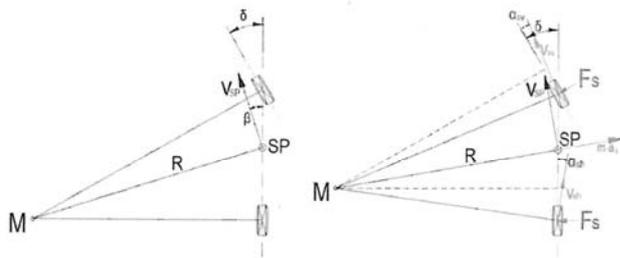


Abb. 1: Ein-Spur-Modell einer sehr langsamen (links) und schnellen Kreisfahrt (rechts) [Quelle: S+B]

Bei der langsamen Kreisfahrt bewegt sich der Schwerpunkt auf einer konstanten Kreisbahn mit dem Radius  $R$  um den Momentanpol ( $M$ ). Der Lenkwinkel, der erforderlich ist, um einen bestimmten Kurvenradius zu fahren, wird als Ackermann-Lenkwinkel ( $\delta$ ) bezeichnet (HAKEN, Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik, 2008). Der Ackermann-Lenkwinkel ist jedoch allein von den geometrischen Daten abhängig. Ein weiterer Anteil des für die konstante Kurvenfahrt erforderlichen Lenkwinkels wird durch den Einfluss der Querbeschleunigung charakterisiert. Bei schnellerer Fahrt ist der Lenkwinkel zu erhöhen, um die Kurve, genau wie im quasistatischen Bereich, befahren zu können. Bewegt sich eine Masse auf einer Kreisbahn, so kommt es zu einer Fliehkraft, die von den Rädern an den Radaufstandspunkten aufgenommen werden muss. Diese Kraft greift am Fahrzeugschwerpunkt ( $SP$ ) an und ist definiert als Produkt aus der Masse und der (Quer-)Beschleunigung ( $m \times a_q$ ). Ursache für den Einfluss der Querbeschleunigung auf den Lenkwinkel ist, dass sich aufgrund dieser wirkenden Querkraft an den Fahrzeugrädern sog. Schräglaufwinkel ( $\alpha_s$ ) einstellen.

Die Beträge des Schräglaufwinkels an der Vorder- bzw. Hinterachse weichen voneinander ab. Diese Differenz kann durch den Fahrer über die Regulierung des Lenkwinkels beeinflusst werden und bildet die Basis für das Lenkverhalten in Bezug auf das Über- bzw. Untersteuern eines Fahrzeugs. Kommt es zu einer maximalen Querbeschleunigung, wird bei einem übersteuernden Fahrzeug zuerst an der Hinterachse und bei einem untersteuernden Fahrzeug zuerst an der Vorderachse die Kraftschlussgrenze überschritten. In diesem Fall steigt der Schräglaufwinkel an der entsprechenden Achse unkontrolliert an. Ferner

kommt es beim untersteuernden Fahrzeug zu einer Abnahme des sog. Schwimmwinkels ( $\beta$ , Abb. 1 links). Der Schwimmwinkel ist definiert als der auf die Fahrbahn abgebildete Winkel zwischen Fahrzeugmittelebene und Schwerpunktschwindigkeit (ECKSTEIN, Vertikal- und Querdynamik von Kraftfahrzeugen, Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen, 2010).

Nach ACKERMANN lässt sich der Momentanpol ( $M$ ), der Kurvenmittelpunkt, aus dem Schnittpunkt der verlängerten Radachsen bestimmen. Durch Bestimmung des Momentanpols ist es möglich, die Bewegung eines, sich translatorisch und rotatorisch bewegenden Körper, als reine Drehung um einen Punkt (den Momentanpol) zu beschreiben. Die sich bei höheren Geschwindigkeiten einstellenden Schräglaufwinkel, die auch als Abweichung (Winkel) zwischen der Bewegungsrichtung des Rads und der Radlängsachse beschrieben werden können, führen zu einer Verschiebung des Momentanpols.

Diese Abhängigkeit der Lenkeigenschaften eines Fahrzeugs von der Querkraft wird in ihrer Wirkung als **Eigenlenkverhalten** bezeichnet (ECKSTEIN, a.a.O.) Das Eigenlenken durch die sich einstellenden Schräglaufwinkel (Verschiebung des Momentanpols) verstärkt sich bei zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit bzw. bei Erhöhung der Querbeschleunigung.

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Auswirkungen dieser Zusammenhänge auf den Wendekreis. Hierzu wurden die folgenden Versuche durchgeführt.

## II. Versuchsdurchführung

Aus der vorangegangenen Untersuchung ist die gute Reproduzierbarkeit der vom Hersteller angegebenen Werte für die Wendekreisdurchmesser bei Geschwindigkeiten zwischen 6 und 8 km/h bekannt (DIETRICH, VRR 2012, 457). Für die Untersuchung des Wendekreisverhaltens bei höheren Geschwindigkeiten wurden die Kreisfahrten auf drei Geschwindigkeitsniveaus gefahren. In Vorversuchen wurden sinnvolle und umsetzbare Geschwindigkeiten zu etwa 10, 20 und 25 km/h ermittelt. Bei Geschwindigkeiten um 25 km/h kam es bei allen Fahrzeugen bereits zum Reifenquietschen. Die Versuche wurden auf trockener, sauberer Fahrbahn, durch einen erfahrenen Testfahrer, durchgeführt. Als Versuchsfahrzeuge kamen ein VW Up, ein VW Fox, ein VW Passat und ein VW T5 zum Einsatz.

Die Runden wurden in Blöcken gefahren, in denen der Testfahrer immer für zwei Runden die entsprechende Geschwindigkeit gehalten hat, um anschließend auf die nächsthöhere Geschwindigkeit zu beschleunigen. Zur Messung der Geschwindigkeit wurden redundante Messsysteme verwendet. Zum einen wurde eine prozessorgesteuerte Speichereinheit mit Beschleunigungssensoren und GPS-Einheit (Data Logger) in den Fahrzeugen montiert. Hiermit konnten neben der Geschwindigkeit u.a. auch die Querbeschleunigungen aufgenommen werden. Zum anderen durchfahren die Fahrzeuge nach jeder Runde eine Lichtschranke zur zusätzlichen Geschwindigkeitsmessung. Die genauen Bewegungslinien bzw. der genaue Spurverlauf der Fahrzeuge konnte

durch eine Kamera aus der Vogelperspektive in Kombination mit einem auf dem Untergrund befindlichen Raster nachvollzogen werden. Mithilfe von Videobearbeitungs- und CAD-Programmen wurde sowohl der Innenkreis als auch der Wendekreisdurchmesser aus jeder Runde ausgewertet, vgl. Abb. 2.

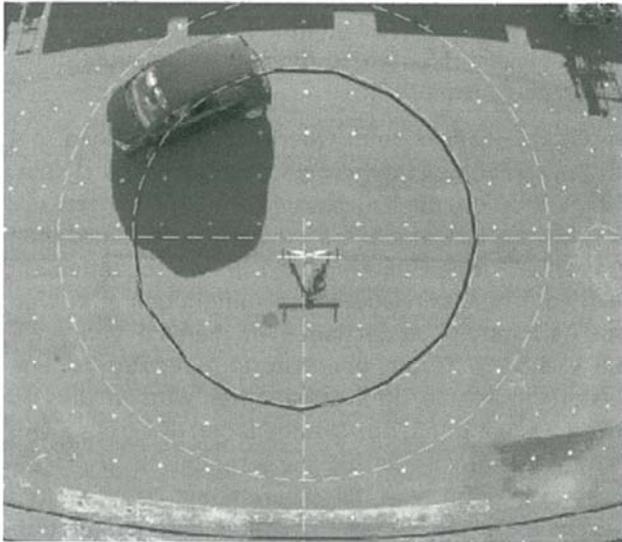


Abb. 2: Auswertung der Kreisbahnfahrt beim VW Up – Bild aus der Topkamera [Quelle: S+B]

Die gemessenen Werte zur Beschleunigung und Geschwindigkeit wurden mithilfe eines Analyseprogramms der Firma **Race Technology** ausgelesen, vgl. Abb. 3. Die Kurve oben links zeigt die Geschwindigkeit über die Zeit. Hier sind deutlich die verschiedenen Geschwindigkeitsniveaus zu erkennen. Unten sieht man eine partielle Detailansicht über die gemessene Längs- und Querb beschleunigung sowie ebenfalls über die Geschwindigkeit. Des Weiteren bestand hier die Möglichkeit, sich für jeden Messpunkt alle relevanten Daten in einer Wertetabelle anzeigen zu lassen (s. Tabelle rechts im Bild). Die Messwerte konnten über das Programm ausgelesen und für die weitere Auswertung exportiert werden.

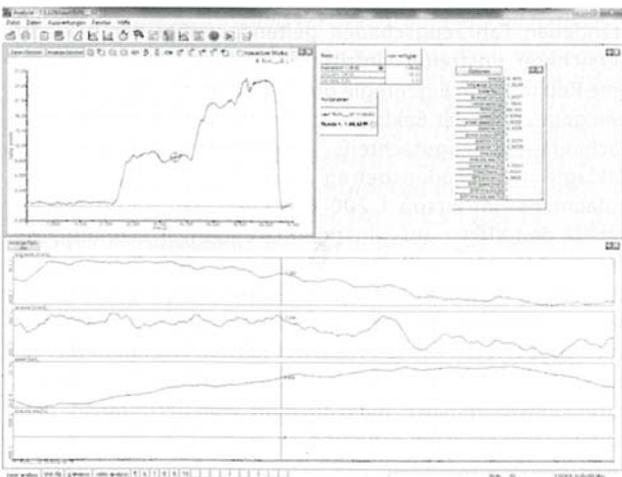


Abb. 3: Auswertung der mithilfe des Data Loggers gemessenen Werte (VW Up) [Quelle: S+B]

### III. Ergebnisse

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der Versuchsfahrten. Für Geschwindigkeit und Querb beschleunigung ist jeweils der Mittelwert der Runde angegeben. Der Wendekreisdurchmesser bezieht sich auf den bei einer Kurvenfahrt am weitesten außen liegenden Punkt an der Fahrzeugkarosserie. Bei Pkw ist dieser in den meisten Fällen vorne links (bei Rechtskurven) bzw. vorne rechts (bei Linkskurven) am Stoßfänger zu finden.

Der gemessene Wendekreis bei den geringeren Geschwindigkeiten im Bereich unter 10 km/h zeigt kaum Abweichungen von den durch den Hersteller angegebenen Werten. Die Querb beschleunigungen in den Fahrzeugen lagen bei den Runden auf dem niedrigsten Geschwindigkeitsniveau zwischen etwa 1 und 1,5 m/s<sup>2</sup>. Bei etwa einer Verdopplung der Geschwindigkeit fällt ein hoher Sprung bei den Querb beschleunigungen auf. Diese steigen um mehr als das Vierfache auf Werte zwischen etwa 5,2 und 6,3 m/s<sup>2</sup> an. Während die Geschwindigkeiten sich verdoppeln und die Querb beschleunigungen auf etwa das Vierfache steigen, kommt es bei den gemessenen Wendekreisen nur zu sehr geringen Vergrößerungen von wenigen Prozent. Im letzten Schritt wurde die Geschwindigkeit um etwa 5 km/h gesteigert. Eine höhere Geschwindigkeit konnte von dem erfahrenen Testfahrer unter den Messbedingungen nicht mehr kontrolliert gefahren werden. Die Querb beschleunigungen erhöhen sich um etwa das 1,3-fache. Einzig bei den Fahrten des Passat kommt es zu einer stärkeren Differenz. Dies hängt allerdings direkt mit der etwas niedrigeren mittleren Geschwindigkeit auf dem zweiten Niveau zusammen.

Bei dieser zweiten Erhöhung der Geschwindigkeit, somit auch der Querb beschleunigung und Querkraft kommt es zu deutlicheren Veränderungen des Wendekreisdurchmessers. Im Vergleich zu den Wendekreisen beim mittleren Geschwindigkeitsniveau steigen die Durchmesser um etwa 10 bis sogar 20 % an.

Fahrzeug	Geschwindigkeit [km/h]	Querb beschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	Wendekreis [m]
VW Up	9,9	1,48	9,71
VW Up	20,5	6,32	9,94
VW Up	24,75	8,39	11,02
VW Fox	9,6	1,33	10,66
VW Fox	21,2	6,23	10,95
VW Fox	24,9	7,34	13,34
VW Passat	8,9	1,12	11,40
VW Passat	18,5	4,86	11,47
VW Passat	25,2	8,26	12,51
VW T5	9,3	0,97	11,74
VW T5	21,3	5,24	12,06
VW T5	25,7	7,02	13,53

Tabelle 1: Ergebnisse der durchgeführten Versuche – Mittelwerte aller Versuchsfahrten

Es zeigt sich also, dass erst ab einem kritischen Geschwindigkeitsniveau die Querkraft groß genug ist, dass die Kraftschlussgrenze zwischen Reifen und Fahrbahn überschritten wird und der Schräglaufwinkel unkontrolliert ansteigt, was dann zu einer Vergrößerung des erforderlichen Wendekreises führt.

#### IV. Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Auswirkungen von Geschwindigkeit bzw. den wirkenden Querbeschleunigungen auf den benötigten Wendekreisdurchmesser untersucht. Hierzu wurden Fahrversuche mit verschiedenen Fahrzeugen auf drei unterschiedlichen Geschwindigkeitsniveaus durchgeführt.

Trotz eines starken Anstiegs der Querbeschleunigungen bei einer Verdopplung der Geschwindigkeit von etwa 10 auf etwa 20 km/h kam es nur zu marginalen Veränderungen des Wendekreisdurchmessers. Erst bei einer erneuten Erhöhung des Geschwindigkeitsniveaus auf etwa 25 km/h vergrößerte sich der benötigte Wendekreisdurchmesser bei allen Fahrzeugen deutlich um 10 – 20 %.

Auswirkungen auf das Maß der Abhängigkeit von Querbeschleunigung und Vergrößerung des Wendekreises sind auch bei Fahrzeug- und Reifenparametern zu suchen. So erfolgt die Linearisierung der Reifeneigenschaften im Rahmen des Ein-Spur-Modells bspw. durch die sog. Schräglaufsteifigkeit (ECKSTEIN, a.a.O.). Diese hängt sehr stark von Radlast, Reifeninnendruck und auch vom Reifentyp ab. Ein Ausblick wäre also möglicherweise, diese Auswirkungen durch Variation der Parameter an einem Fahrzeug herauszuarbeiten. Wie stark also der Einfluss von Reifenparametern bzw. der Einfluss der Schräglaufsteifigkeit auf dieses Ergebnis ist, wäre durch entsprechende Untersuchungen zu überprüfen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es ab einer kritischen Fahrgeschwindigkeit, bei der das Fahrzeug

mit quietschenden Rädern nahe der physikalischen Kurvengrenzgeschwindigkeit gefahren wird, zu einer deutlichen Vergrößerung des Wendekreises kommt. Bis zu diesem Punkt ist der Einfluss der Geschwindigkeit und somit der Querkraft auf den Wendekreisdurchmesser allerdings marginal. Dies bedeutet, dass erst bei extremer Kurvenfahrt mit Querbeschleunigungen, die ein Normalfahrer i.d.R. nicht erreicht, deutliche Vergrößerungen des Wendekreisdurchmessers zu erwarten sind.

In NICKEL, Längs- und Querbeschleunigungen bei normaler Fahrt, Diplomarbeit Fachhochschule Köln, 2001, wurden die Querbeschleunigungen bei verschiedenen Fahrmanövern sowie bei verschiedenen Kurvenkategorien untersucht. Die im Probandenkollektiv auftretenden Querbeschleunigungen in Kurven mit geringeren Radien lagen im Bereich von etwa 2,5 – 4,5 m/s<sup>2</sup>. Die über Literatur hinzugezogene Sicherheitsgrenze für Normalfahrer wird in diesem Bereich sogar mit 3,7 m/s<sup>2</sup> angegeben (NICKEL, a.a.O.). Betrachtet man erneut die Messergebnisse aus Tabelle 1, so erkennt man, dass bereits auf dem zweiten Geschwindigkeitsniveau Querbeschleunigungen auftraten, die der normale Fahrer beim Durchfahren einer Kurve bzw. beim Durchführen eines Wendevorgangs i.d.R. nicht erreicht. Der Wendekreisdurchmesser verändert sich in diesem Bereich jedoch nur marginal. Es kann also in den meisten Fällen von einer nur geringen Abweichung des durch die Herstellerangaben bekannten Wendekreisdurchmessers ausgegangen werden.