

K.H. Schimmelpfennig*
N. Hebing**

Geschwindigkeiten bei kreisförmiger

Kurvenfahrt

Stabilitäts- und Sicherheitsgrenze

Die Ausarbeitung wurde im Rahmen der Arbeitsgemeinschaft für Unfallrekonstruktion – UREKO – durch das Ing.-Büro Düringer u. Bense Hamburg gefördert.

Geschwindigkeit

Bei der Beurteilung von Kurvenunfällen ist die Bestimmung der maximal möglichen Fahrgeschwindigkeit in der Kurve unter Umständen ein wichtiges Beurteilungskriterium über den Unfallhergang. Diese Kurvengrenzgeschwindigkeit berechnet sich aus der Querschleunigung a_q und dem Kurvenradius r zu:

$$v = \sqrt{a_q \cdot r} \quad (1)$$

Liegt eine Kurvenüberhöhung vor, so muß die Formel (1) in folgender Weise modifiziert werden;

$$v = \sqrt{(a_q + g \cdot \text{Stg}/100) \cdot r} \quad (2)$$

wobei Stg die Kurvenüberhöhung in % ist, (siehe auch Bild 1)

Querbeschleunigung

Problematisch ist in erster Linie die Festlegung der Querbeschleunigung. Man muß hierbei grundsätzlich unterscheiden zwischen der maximal möglichen und der tatsächlichen – im Normalverkehr – auftretenden Querbeschleunigung. Die maximal mögliche Querbeschleunigung ergibt sich aus dem Gleitbeiwert μ des Systems Straße-Rad. Ist

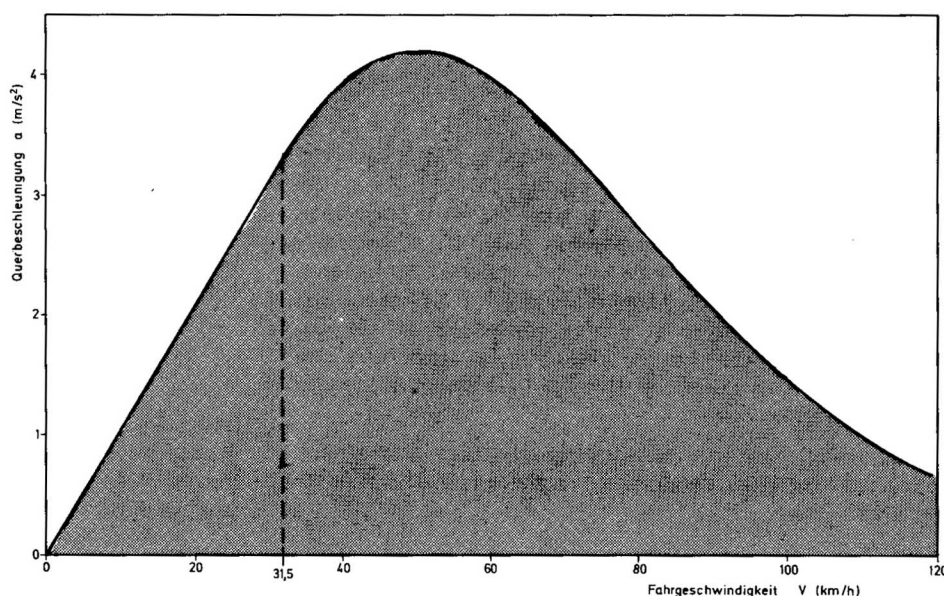
$$a_q > \mu \cdot g \quad (3)$$

fängt das Fahrzeug an zu schleudern oder zu rutschen. Damit ist die **Stabilitätsgrenze** definiert.

Die tatsächlich auftretenden Querbeschleunigungen sind abhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit. Dies zeigen z.B. Versuche von Daimler-Benz [1]. Maximale Querbeschleunigungen um 4 m/s^2 treten auf bei Fahrgeschwindigkeiten um 50 km/h . Bei größeren oder kleineren Fahrgeschwindigkeiten liegen die Querbeschleunigungen unter diesem Maximalwert. Die tatsächlich auftretenden Querbeschleunigungen liegen somit deutlich unter der Stabilitätsgrenze. Die Gründe für dieses Fahrverhalten sind schwer zu erklären. Burckhardt [1] kommt zu der Auffassung, daß die Überschaubarkeit der Streckenführung eine Rolle spielt, aber auch der Reisekomfort des Fahrers und der Insassen. Spindler [2] zeigt in seiner Arbeit, daß die Möglichkeit zum Ausweichen bei größer werdender Geschwindigkeit immer geringer wird, wenn der Fahrer eine gewisse Querbeschleunigung nicht überschreiten möchte. Da bei der Kurvenfahrt schon eine Querbeschleunigung vorhanden ist, muß der Fahrer im Interesse seiner eigenen Sicherheit seine Geschwindigkeit so wählen, daß er einem plötzlich auftretendem Hindernis noch gefahrlos ausweichen kann. Es läßt sich daher im Gegensatz zur Stabilitätsgrenze eine **Sicherheitsgrenze** des »Normalfahrers« definieren. In Anlehnung an [1] wird für den Verlauf der Sicherheitsgrenze die in Bild 1 dargestellte Abhängigkeit vorgeschlagen. Die Kurve läßt sich analytisch folgendermaßen beschreiben:

$$a_q = \begin{cases} 0,103 \cdot v & v < 31,5 \text{ km/h} \\ \frac{v^2}{157} \cdot e^{-(v/41,3)^{1,5}} & v > 31,5 \text{ km/h} \end{cases} \quad (4)$$

Bild 1
Querbeschleunigung über
Fahrzeuggeschwindigkeit



*Dipl.-Ing. (TU) K.H. Schimmelpfennig
Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle
**Dipl.-Physiker N. Hebing
Mitarbeiter im Ing.-Büro Schimmelpfennig und Becke
Im Bilskamp 2 f, 4400 Münster-Wolbeck

Fahrgeschwindigkeit und Bahnradius

Mit Hilfe der Gleichungen (4) und (2) läßt sich der Zusammenhang zwischen Fahrgeschwindigkeit, Kurvenradius und Querneigung

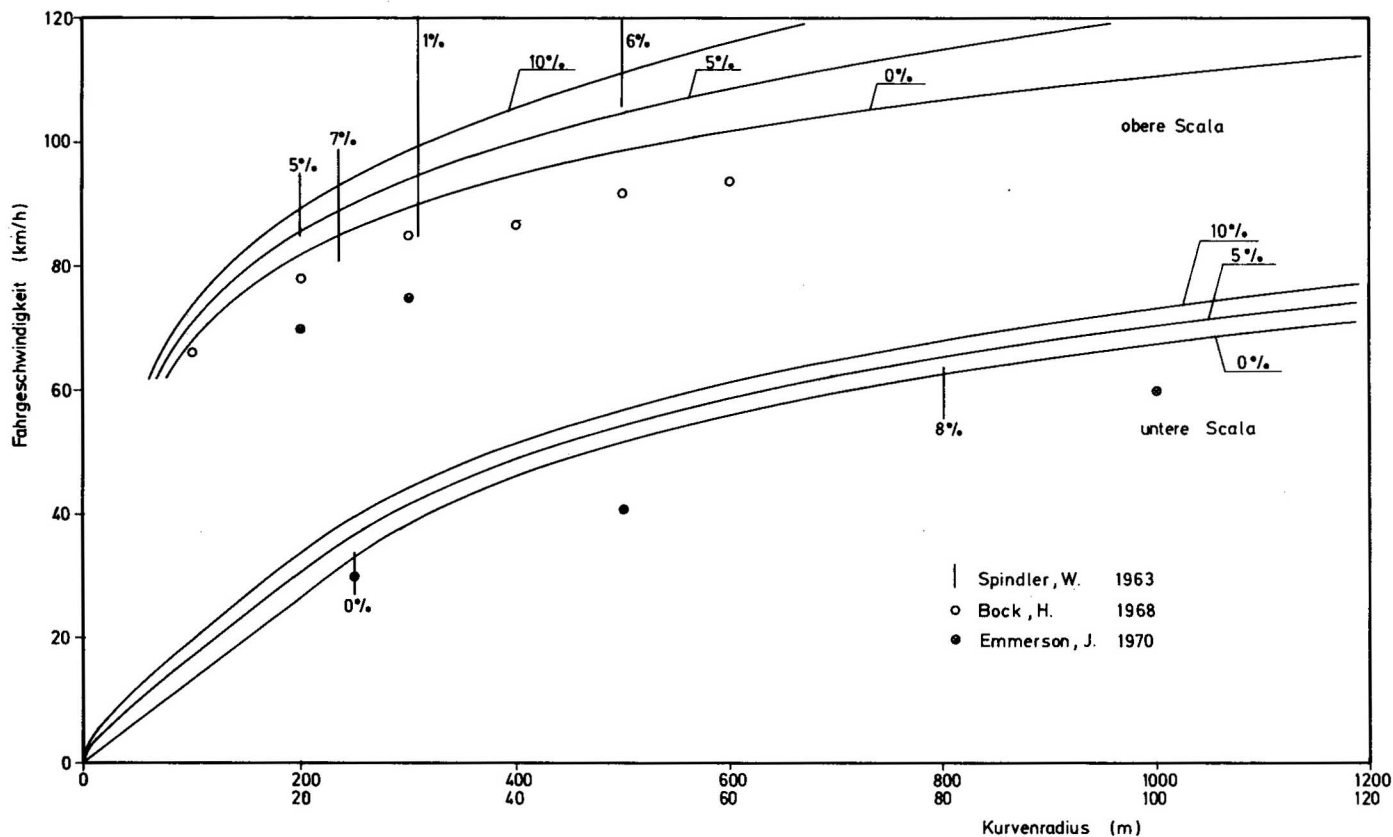


Bild 2 Fahrgeschwindigkeit über Kurvenradius – Sicherheitsgrenzwerte –

der Fahrbahn berechnen. Das Ergebnis ist in Bild 2 graphisch dargestellt. Für eine Kurve ohne Fahrbahnerhöhung ergibt sich folgender formelmäßiger Zusammenhang:

$$v = \begin{cases} 1,34 \cdot r & r < 23 \text{ m} \\ 41,3 \cdot \sqrt{\ln \left(\frac{r}{12,1} \right)} & r > 23 \text{ m} \end{cases} \quad (5)$$

Besitzt die Kurve eine Querneigung, so erhöht sich die Geschwindigkeit näherungsweise um den Betrag Δv .

$$\Delta v \approx 0,9 \cdot \text{Stg} \quad (6)$$

In Bild 2 sind weiterhin die Versuchsergebnisse einiger Autoren eingetragen.

Spindler hat die Geschwindigkeit von Fahrzeugen in ausgesuchten Kurven im Raum München gemessen. 10% aller Fahrzeuge fuhr in dem Geschwindigkeitsbereich, der durch die Strichlänge markiert ist. Die Zahlen an den Strichen geben die Kurvenerrhöhung in % an. Die restlichen 90% fuhr langsamer. Die Messungen von Bock und Emmerson sind in [3] zitiert. Die Angaben von Bock entsprechen maximalen Fahrgeschwindigkeiten, die von Emmerson sind mittlere Geschwindigkeiten. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen der definierten **Sicherheitsgrenze** und den Meßergebnissen.

Durch die Definition der **Sicherheitsgrenze** liegt eine direkte Abhängigkeit zwischen Bahnradius und Fahrgeschwindigkeit für einen »Normalfahrer« vor.

Kurven- und Bahnradius

Für den Fahrer ergeben sich beim Durchfahren einer Kurve zwei Möglichkeiten. Er kann einerseits seiner Fahrspur folgen und damit einen Bahnradius wählen, der dem Kurvenradius entspricht.

Auf der anderen Seite besteht für ihn die Möglichkeit, die Kurve zu schneiden. Dies kann einmal durch Ausnutzung der eigenen Fahrspurweite oder durch Ausnutzung der gesamten Fahrbahnweite erfolgen. Da in diesen Fällen der Bahnradius größer wird, kann die Kurve bei gleicher Querbewegung mit einer höheren Geschwindigkeit durchfahren werden.

Nimmt man für beide Fälle an, daß die Schwerpunktbahn eine Kreisbahn ist, so läßt sich der Bahnradius beim Schneiden der Kurve berechnen.

Dazu muß zunächst die Kurve vermessen werden. Die interessierenden Größen sind dabei die Straßenbreite d , der halbe Wert der Richtungsänderung α und die Tangentenlänge l , siehe Bild 3. Die Schwerpunktbahn des Fahrzeuges befindet sich mindestens eine halbe Fahrzeugbreite b vom Fahrbahnrand entfernt. Damit berechnet sich zunächst eine korrigierte Tangentenlänge l_0 .

$$l_0 = l - \frac{b/2}{\tan \alpha} \quad (7)$$

Mit dieser Größe folgt der Bahnradius der Schwerpunktbahn, wenn das Fahrzeug im konstanten Abstand zum Fahrbahnrand gefahren wird.

$$r_0 = l_0 \cdot \tan \alpha \quad (8)$$

Dies wäre die Soll-Bahn des Fahrzeuges. Schneidet der Fahrer die Kurve und befindet sich der Schwerpunkt des Fahrzeuges im Scheitelpunkt der Kurve um die Länge Δs von der Soll-Bahn entfernt, so ergibt sich der Bahnradius zu:

$$r = \Delta s \cdot \frac{\sin \alpha}{1 - \sin \alpha} + r_0 \quad (9)$$

In diesem Fall muß der Fahrer die Kurve auch früher ansetzen. Es gilt:

$$\Delta l = \Delta s \cdot \frac{\cos \alpha}{1 - \sin \alpha} \quad (10)$$

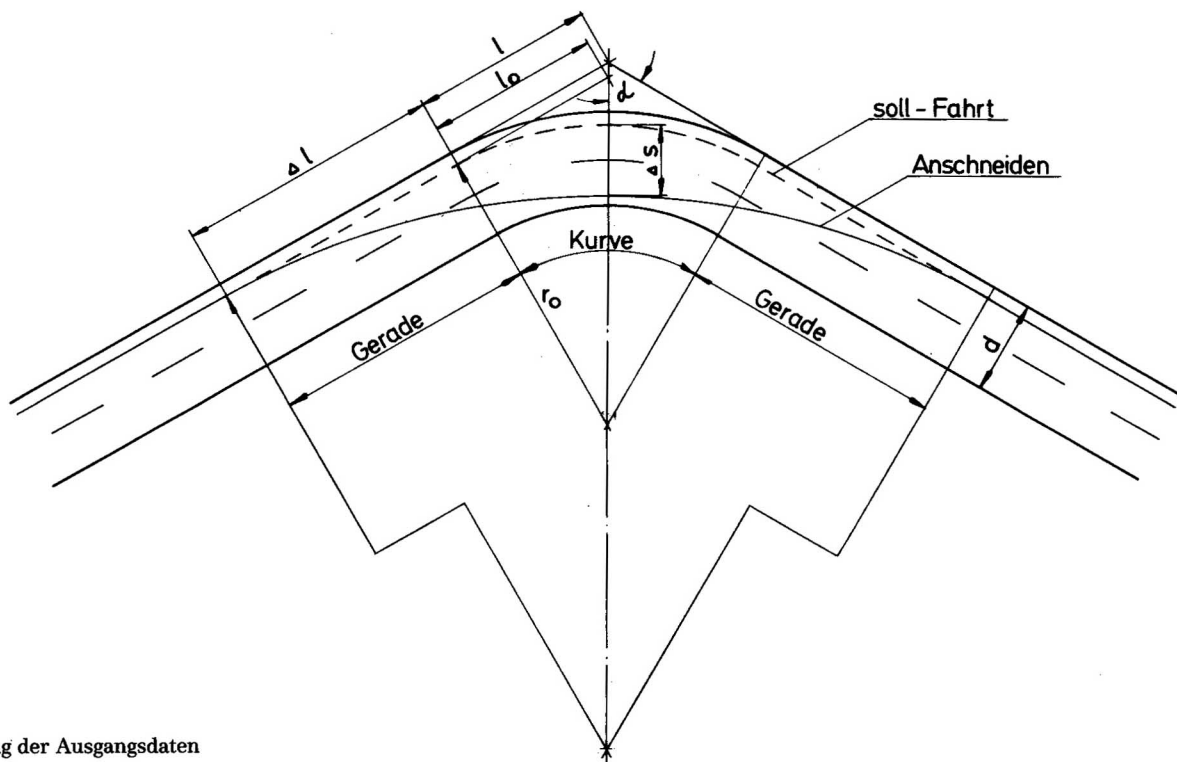


Bild 3
Festlegung der Ausgangsdaten

Der maximale Betrag von Δs ergibt sich aus der Fahrbahnbreite und der Fahrzeugbreite:

$$\Delta s_{\max} = d - b \quad (11)$$

Mit dem maximalen Wert für Δs folgt auch ein maximal möglicher Bahnradius. Damit muß die Kurve auch um eine entsprechende Länge Δl vorher angesetzt werden.

Beispiel

Die Anwendung der dargelegten Gleichungen soll an einem Beispiel gezeigt werden:

Durch Vermessung der Kurve liegen die Werte für $L = 20 \text{ m}$, $\alpha = 60^\circ$, 5% Überhöhung und $d = 7 \text{ m}$ vor. Weiter ist die Fahrzeugbreite mit $b = 1,6 \text{ m}$ bekannt.

Die gestellten Fragen zur Höhe der Geschwindigkeiten für **Stabilitäts- und Sicherheitsgrenze** lassen sich wie folgt beantworten:

Fährt der Fahrer innerhalb seiner Fahrspur rechts, dann folgt aus (7 und 8) ein Bahnradius von

$$r_0 = \left(20 - \frac{0,8}{\tan 60^\circ}\right) \cdot \tan 60^\circ = 33,8 \text{ m}$$

Die Stabilitätsgrenze des Fahrzeuges liegt nach Gleichung (2) mit $a_q = 7 \text{ m/s}^2$ bei $v_{\text{Stabilität}} = 57 \text{ km/h}$.

Die Sicherheitsgrenze für einen Normalfahrer gibt sich aus (5 und 6) zu

$$v_{\text{Sicherheit}} = 0,9 \cdot \text{Stg} + 41,3 \cdot \sqrt[1,5]{\ln \left(\frac{r}{12,1} \right)} = 46,5 \text{ km/h}$$

(Anmerkung $\sqrt[n]{x} = x^{1/n}$)

Wird innerhalb der Fahrspur die Kurve angeschnitten, dann beträgt der Radius der Bahnkurve nach (9)

$$r = (3,5 - 1,6) \frac{\sin 60^\circ}{1 - \sin 60^\circ} + 33,8 = 46,1 \text{ m}$$

Die hierzu gehörige Stabilitätsgrenze beträgt $v_{\text{st}} = 67 \text{ km/h}$, für die Sicherheitsgrenze folgt $v_{\text{sich}} = 54,6 \text{ km/h}$.

Wird die Kurve unter Ausnutzung der gesamten Fahrbahnbreite angeschnitten, dann beträgt die Bahnkurve $r = 68,7 \text{ m}$. Diese Bahnkurve muß nach Gleichung (10) ca. 20 m früher angesetzt werden. Die Stabilitätsgrenze liegt um $v_{\text{st}} = 82 \text{ km/h}$, die Sicherheitsgrenze bei $v_{\text{sich}} = 64 \text{ km/h}$.

Literaturnachweis

- [1] Burckhardt, M.: »Fahrer, Fahrzeug, Verkehrsfluß und Verkehrssicherheit« der Verkehrsunfall (1977) Heft 2 Seite 25
- [2] Spindler, W.: »Weg und Querbeschleunigungen bei der Kurvenfahrt von Kraftfahrzeugen« ATZ 67 (1965) Seite 150 und 229
- [3] Dilling, J.: »Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen auf kurvigen Strecken« Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (1975) Heft 151, Anlage 1 und 2