

Karl-Heinz Schimmelpfennig*, Udo Nackenhorst**

Bedeutung der Querbeschleunigung

in der Verkehrsunfallrekonstruktion

– Sicherheitsgrenze des Normalfahrers –

– Nachdruck aus DAR 2/85 –

In einer ersten Untersuchung wurde versucht, neben der Stabilitätsgrenze des Fahrzeugs die »Sicherheitsgrenze des Normalfahrers« als Kriterium für die Beurteilung des Fahrverhaltens bei Kurvenunfällen zu definieren [1].

Die durch diese Veröffentlichung entstandene Korrespondenz mit Burckhardt ließ es lohnenswert erscheinen, sich speziell für die Belange der Verkehrsunfallrekonstruktion weiter mit der Problematik der »Querbeschleunigung« zu beschäftigen.

Während einer Lehrtätigkeit wurde eigens zu diesem Thema eine Arbeit vergeben [2]. Die in diesem Rahmen durchgeführten Fahrversuche förderten interessante Ergebnisse zutage; sie bilden den Hintergrund für die folgenden Ausführungen.

Begriffsbestimmung »Querbeschleunigung«

Querbeschleunigungen werden hervorgerufen durch eine Richtungsänderung des Geschwindigkeitsvektors; ihre Höhe ist abhängig von der auf einem bestimmten Kurvenradius gefahrenen Geschwindigkeit. Als Produkt mit der Masse eines Körpers ergibt sich aus der Querbeschleunigung die Flieh- bzw. Zentrifugalkraft.

Wenn ein Fahrzeug nicht geradeaus gefahren wird, treten Querbeschleunigungen und mit ihnen Zentrifugalkräfte auf. Um den Fahrvorgang weiterhin stabil zu halten, müssen sie durch Seitenführungskräfte aufgefangen werden. Die Seitenführungskraft aber ist begrenzt. Wird ihre Grenze überschritten, verliert das Fahrzeug seine Stabilität und bricht aus.

Einflußbereich der Querbeschleunigung

Ein Fahrzeug verläßt die Geradeausfahrt entweder nach einem Lenkradeinschlag oder nach einer Kollision infolge der dann auftretenden Störkräfte (Abb. 1). Wird die Lenkung »überzogen«, dann ist der weitere Bewegungsverlauf des Fahrzeugs vergleichbar mit dem Bewegungsablauf nach einer Kollision: Das Fahrzeug beginnt zu schleudern, es bewegt sich unkontrolliert oberhalb der Stabilitätsgrenze.

Werden bei instabilen Fahrvorgängen Schleuderspuren auf der Fahrbahn gezeichnet, dann kann die Geschwindigkeitsrückrechnung für Segmente der Schleuderspuren mit Hilfe der Querbeschleunigungsgrenze vorgenommen werden. Das ist gängige Rekonstruktionspraxis und in der Handhabung problemlos.

Bedeutend schwieriger zu erfassen ist der Einfluß der Querbeschleunigung bei stabilem Kurswechsel, da es in diesem Fall keine Spurzeichnung auf der Fahrbahn gibt. Unabhängig von einer direkten Zuordnung anhand einer Spurzeichnung müssen deshalb die benötigten Daten allein aus den 'Gegebenheiten der Örtlichkeit', den 'Möglichkeiten des Fahrzeugs' und der 'Beherrschung des Fahrzeugs durch den Menschen' rekonstruiert werden.

*Dipl.-Ing. (TU) Karl-Heinz Schimmelpfennig, Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle, Ing.-Büro Schimmelpfennig und Becke, 4400 Münster-Wolbeck

**Dipl.-Ing. (FH) Udo Nackenhorst

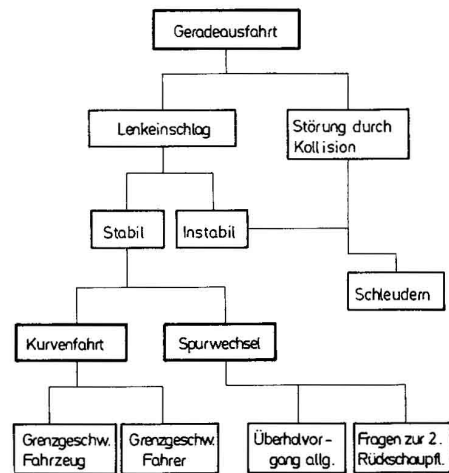


Abb. 1

Aus der Geradeausfahrt können durch Lenkradeinschlag zwei unterschiedlich zu betrachtende Fahrvorgänge hervorgerufen werden: zum einen die Kurvenfahrt, also das Durchfahren einer langgestreckten Kurve, zum anderen der Spurwechsel auf gerader oder ungerader Strecke zu Beginn oder am Ende eines Überholvorgangs.

Bei einer Kurvenfahrt wird nach Verkehrsunfällen die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit der Fahrzeuge in der Regel mit Hilfe der üblichen Geschwindigkeitsrückrechnungs-Methoden ermittelt werden können. Damit die so bestimmte Geschwindigkeit aber im Rahmen der rechtlichen Würdigung beurteilt werden kann, müssen von der Technik relevante Beurteilungsmaßstäbe vorgeschlagen werden.

Die gängige Praxis ist es, die Kurvengrenzeschwindigkeit, d.h. die Stabilitätsgrenze des Fahrzeugs, als den grundlegenden Maßstab anzusehen.

Nicht unterschätzt werden darf aber die Bedeutung der Geschwindigkeit, mit der ein Fahrer eine Kurve kontrolliert durchfahren kann. Diese Geschwindigkeit wurde als »Sicherheitsgrenze des Normalfahrers« definiert [1].

Auch beim Spurwechsel zu Beginn und am Ende eines Überholvorgangs treten Querbeschleunigungen auf. Für die Rückrechnung sind in diesem Fall jedoch andere Fragestellungen relevant: So interessiert z.B. die Gesamtlänge des Überholwegs bzw. der Zeitraum, der vom Beginn bis zum Abschluß eines Überholvorgangs benötigt wird.

Letztlich ist für die Beurteilung eines Überholvorgangs im Rahmen der rechtlichen Würdigung jedoch allein die zum Überholen notwendige, frei zu übersehende Strecke interessant; diese muß herausgearbeitet und in Relation gesetzt werden zu der tatsächlich vorhandenen Sichtweite.

Der Spurwechsel spielt aber nicht nur bei der Berechnung des gesamten Überholvorgangs eine wichtige Rolle, sondern dient auch zur Klärung der Frage, ob ein Fahrer seiner zweiten Rückschaupflicht nachgekommen ist, wenn er beim Linksabbiegen in einen Unfall mit einem Fahrzeug verwickelt wird, das sich im Überholvorgang befindet.

Es muß festgestellt werden, ob er bereits im Zeitraum seiner zweiten Rückschaupflicht das Aufschließen des überholenden Fahrzeugs im Rückspiegel wahrnehmen konnte oder nicht.

Auch zur Beantwortung dieser Frage kommt der Querbeschleunigung besondere Bedeutung zu, da sie einer der Hauptparameter bei der Beschreibung des Spurwechsels ist.

Querbeschleunigung bei Kurvenfahrt

Die »Sicherheitsgrenze des Normalfahrers« bei einer Kurvenfahrt ist in Orientierung an den gefahrenen Querbeschleunigungen formuliert worden [1].

Es wurde eine Grenzfunktion $a_q = f(V)$ angegeben.

Der geschwindigkeitsabhängige Verlauf der Querbewegung zur Bestimmung der »Sicherheitsgrenze des Normalfahrers« basiert auf Messungen des Fahrverhaltens nach [3]. In diesen Versuchsreihen wurden die Querbewegungswerte berücksichtigt, die länger als 1 s andauerten. Querbewegungsspitzen mit geringerer Einwirkungsdauer werden vom Fahrer lediglich als Stöße empfunden und führen zu keiner direkten Reaktion im Fahrverhalten. In [4] wurde aus gemessenen Geschwindigkeiten und der kleinsten Kurvenkrümmung die Abhängigkeit der Querbewegung von der Fahrgeschwindigkeit berechnet. Diese Messungen wurden an freifahrenden, nicht durch Verkehr behinderten Fahrzeugen durchgeführt. Einen Vergleich der Kurvenläufe zeigt **Abb. 2**.

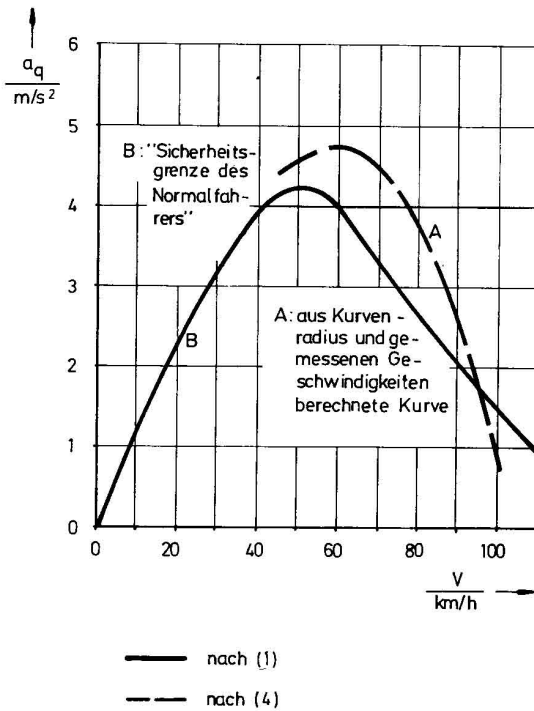


Abb. 2 Querbewegung bei Kurvenfahrt

Da von Burckhardt die Hoffnung ausgedrückt wurde, daß sich die Definition der »Sicherheitsgrenze des Normalfahrers« bei der Bewertung von Fahrvorgängen durchsetzen sollte, wurden zur näheren Untersuchung der Abhängigkeit der Querbewegung von der Fahrgeschwindigkeit weitere Versuche durchgeführt [2]. Das Ziel war die Bestimmung der Grenze, ab der Fahrer die auftretende Querbewegung als »unangenehm« empfinden.

Für die Versuchsfahrten stellten sich Fahrer und Fahrerinnen im Alter von 25 – 50 Jahren zur Verfügung. Vor der Messung legten die Fahrer/innen im Durchschnitt eine Strecke von etwa 5 km zurück, um sich mit dem Versuchsfahrzeug vertraut zu machen.

Die Versuchspersonen wurden angewiesen, die ausgewählten Kurven so schnell zu durchfahren, wie sie es gerade noch als »sicher« bezeichnen würden. Bei den Versuchsstrecken handelte es sich um übersichtliche Kurvenverläufe, auch lag kein Einfluß durch Gegenverkehr vor.

Die gemessenen Querbewegungen sind im Diagramm in **Abb. 3** eingetragen. Zum Vergleich ist auch die Kurve nach [1] eingezeichnet.

Da in unserer Versuchsreihe die Fahrer frei in der Wahl der Geschwindigkeit waren, liegen die Werte, wie erwartet, bei Geschwindigkeiten über 100 km/h deutlich über denen früherer Messungen. Aber auch im Bereich unter 40 km/h wurden höhere Querbewegungen gemessen. Bei den Fahrten im Geschwindigkeitsbereich von 30 – 60 km/h wurde in fast allen Versuchen beschleunigt.

Eine Abhängigkeit vom Meßfahrzeug konnte nicht festgestellt wer-

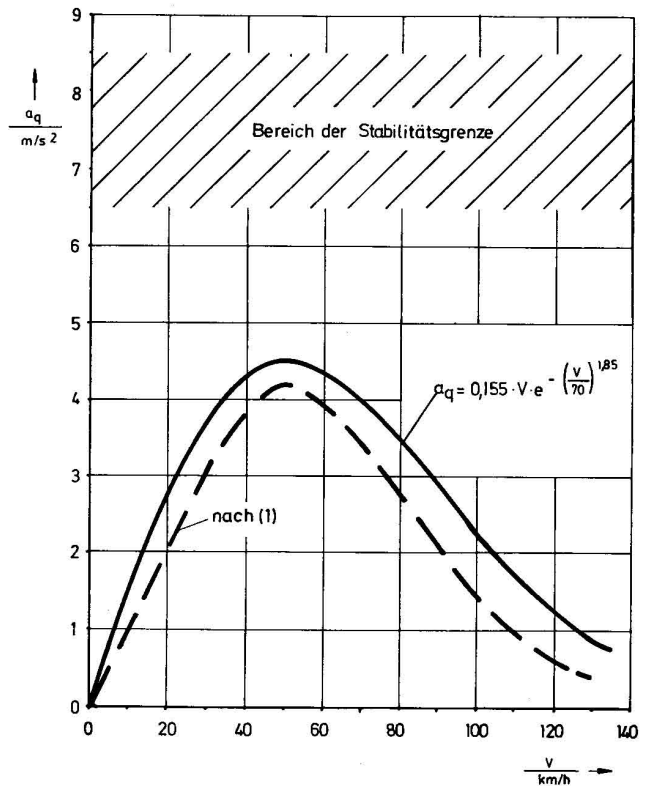


Abb. 3 Querbewegung bei Kurvenfahrten

den. Vergleichsmessungen mit einem leistungsstärkeren Fahrzeug zeigten keine wesentlichen Abweichungen. Der Einfluß der Einwirkungsdauer auf die Höhe der noch als »sicher« empfundenen Querbewegung konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden. Bei hohen Geschwindigkeiten und Kurven mit kleinerem Tangentialwinkel lagen die Meßpunkte zwar geringfügig unter denen von Kurven mit größerem Tangentialwinkel, im unteren Geschwindigkeitsbereich konnten aber sowohl höhere als auch niedrigere Werte festgestellt werden.

In der Untersuchung [5] wurde bei Querbewegungen über 2 m/s² erhöhte Aufmerksamkeit bei den Fahrern festgestellt, die bei Werten über 3 m/s² und zusätzlicher Beanspruchung zur Überforderung führen können.

Auf diesem Hintergrund gewinnt die »Sicherheitsgrenze des Normalfahrers« für die Beurteilung von Kurvenfahrten an Bedeutung. **Abb. 3** zeigt die Abhängigkeit der »riskierten« Querbewegungen von der Fahrgeschwindigkeit auf. Die mathematische Formel lautet:

$$\frac{a_q}{m/s^2} = 0,155 \cdot \frac{v}{km/h} \cdot e^{-\left(\frac{v}{70 km/h}\right)^{1,85}}$$

Als ein wichtiges Ergebnis kann festgehalten werden, daß die Bereitschaft eines Fahrers zu Querbewegungen abnimmt, je höher die gefahrene Geschwindigkeit ist.

Der Techniker kann so mit der Bestimmung der »Sicherheitsgrenze des Normalfahrers« dem Juristen ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung von Kurvenfahrten an die Hand geben. Die Stabilitätsgrenze des Fahrzeugs dagegen sollte für die Einschätzung der Fahrweise eines Normalfahrers nicht mehr herangezogen werden.

Querbewegungen beim Spurwechsel

Auch bei der Berechnung der Spurwechseldauern bzw. der Spurwechseldauern stellt die Querbewegung einen wesentlichen Parameter dar. In der Praxis der Unfallrekonstruktion orientiert man sich auch in diesen Fällen häufig an der Querbewegungsgrenze.

Durch die für die Kurvenfahrt erarbeitete Abhängigkeit der Querbewegung von der Fahrgeschwindigkeit stellte sich die Fra-

ge, ob dieser Zusammenhang auch bei der Berechnung von Spurwechselforgängen angenommen werden kann.

Die Überprüfung dieser Frage erfolgte mit Hilfe von Versuchen in verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen. Die Messungen wurden zum größten Teil auf zweispurigen, geraden Richtungsfahrbahnen im Verkehrsfluß durchgeführt. Für sie stellten sich Fahrerinnen und Fahrer im Alter von 20 – 30 Jahren mit recht unterschiedlicher Fahrpraxis zur Verfügung. Die Versuchspersonen überholten zuerst bei den von ihnen gewählten Geschwindigkeiten ganz »normal«. Nach einer gewissen Gewöhnungszeit an das Meßfahrzeug wurden sie angewiesen, »möglichst scharfe« Spurwechsel zu fahren.

Die gemessenen Querbeschleunigungen sind in **Abb. 4** über der Fahrgeschwindigkeit eingetragen. Wie erwartet nehmen die Werte

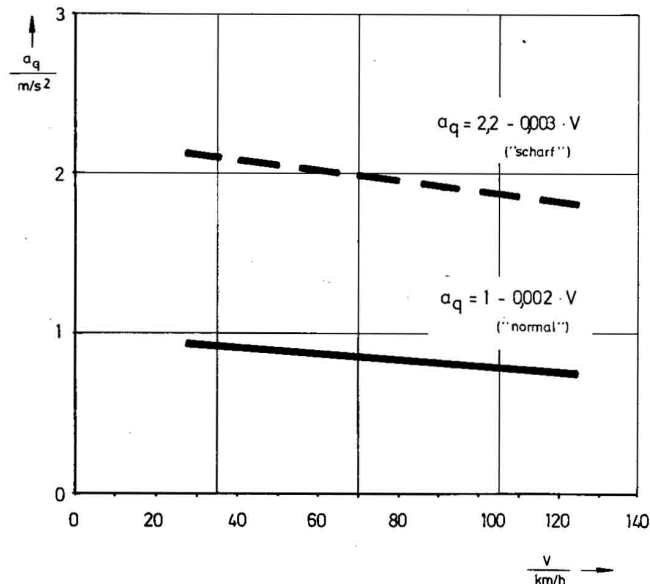


Abb. 4 Querbeschleunigung bei Spurwechselforgängen

bei höheren Fahrgeschwindigkeiten ab, erreichen aber selbst bei »scharfen« Spurwechseln nicht das Niveau der Querbeschleunigungswerte bei Kurvenfahrten (Abb. 3); auch liegt grundsätzlich eine andere Abhängigkeit im Verlauf vor. Eine Regressionsanalyse der mittleren Querbeschleunigungen führt zu Geraden-Gleichungen:

$$\frac{a_q}{\text{m/s}^2} = 2,2 - 0,003 \cdot \frac{v}{\text{km/h}}$$

$$\frac{a_q}{\text{m/s}^2} = 1 - 0,002 \cdot \frac{v}{\text{m/h}}$$

Die in [6] ermittelten Werte werden selbst bei äußerst scharfen Spurwechseln nicht erreicht. Zu erklären ist das mit den geringen

Lenkeinschlägen: Bei spontanen, scharfen Ausweichmanövern wurde das Lenkrad selten mehr als 20° gedreht, während normaler Überholvorgänge oft nur um wenige Grade. Bei diesen geringen Einschlägen wird sich in der kurzen Zeit kein ausreichender Schräglaufwinkel einstellen. Mit Querbeschleunigungen über 2,5 m/s² neigte das Fahrzeug im Geschwindigkeitsbereich um 50 km/h bereits zu heftigen Reaktionen, wodurch eine gewisse Einschwingphase in die neue Fahrspur erforderlich wurde. Die Fahrzeuginsassen empfanden diese Schwingungen als sehr unangenehm.

Ferner wurden höhere Querbeschleunigungen bei größeren Differenzgeschwindigkeiten festgestellt, z.B. wenn stehende Fahrzeuge überholt wurden.

Die genaue Abhängigkeit der Höhe der Querbeschleunigung von der Differenzgeschwindigkeit wurde jedoch meßtechnisch nicht erfaßt.

Bei der Analyse von Spurwechselforgängen ist nach den durchgeführten Messungen somit ein deutlich niedrigeres Querbeschleunigungsniveau anzusetzen als derzeit üblich.

Zusammenfassung

In vielen Bereichen der Verkehrsunfallanalyse wird bis heute die Größenordnung der Querbeschleunigung mit Hilfe der Stabilitätsgrenze des Fahrzeugs eingestuft. Unsere Messungen haben aber gezeigt, daß die Bereitschaft des Fahrers zu bestimmten Querbeschleunigungen von zwei Faktoren abhängt:

- erstens von der Frage, ob eine Kurve oder ein Spurwechsel durchfahren wird,
- zweitens von der gefahrenen Geschwindigkeit.

Beide Faktoren wurden bei der Bestimmung der »Sicherheitsgrenze des Normalfahrers« berücksichtigt. Damit hat der Unfallanalytiker dem Juristen ein Kriterium an die Hand gegeben, mit dessen Hilfe dieser eine Bewertung der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit vornehmen kann.

Literatur:

- [1] Schimmelpfennig, K.-H. und Hebing, N.: »Geschwindigkeiten bei kreisförmiger Kurvenfahrt Stabilitäts- und Sicherheitsgrenze« Der Verkehrsunfall, 1982, Heft 5
- [2] Nackenhorst, U.: »Zusammenfassende Darstellung der Detailprobleme zum Überholvorgang« Diplom-Arbeit, FH Osnabrück, 1984
- [3] Burckhardt, M.: »Fahrer, Fahrzeug, Verkehrsfluß und Verkehrssicherheit« Der Verkehrsunfall, 1977, Heft 2
- [4] Lindemann, H.P. und Ranft, B.: »Geschwindigkeit in Kurven« EDI-Forschungsauftrag 3/77, 1. Teilbericht ETH Zürich – Institut für Verkehrsplanung und Transporttechnik, 1978
- [5] Friedinger, C. und Studach, H.: »Informationsaufnahme und Verhalten des Autofahrers beim Durchfahren von Kurven« Untersuchung im Auftrag der Schweizerischen Konferenz für Sicherheit im Straßenverkehr (SKS) ETH Zürich – Institut für Verkehrswissenschaft, 1982
- [6] Runkel, M.: »Die Bedeutung der Sichtbehinderung durch Lastkraftwagen für Überholvorgänge auf zweispurigen Landstraßen« Dissertation, TH Stuttgart, 1969