

Die zeitpräzise Auswertung von Diagrammscheiben

Dipl.-Ing. Wolfgang Hugemann
Ingenieurbüro Morawski + Hugemann
von-Diergardt-Str. 19
51375 Leverkusen
GERMANY
hugemann@muenster.net

Kurzzusammenfassung

Wird ein Lkw in einen Verkehrsunfall verwickelt, so kann seine Bewegung aus der Diagrammscheibenaufzeichnung abgeleitet werden. Die Auswertung wird derzeit mittels mechanischer Geräte vorgenommen. Der Aufsatz analysiert die Fehler, die bei dieser Auswertung entstehen. Den theoretischen Ausführungen folgen tatsächliche Messungen. Auf diese Weise werden die Umstände herausgearbeitet, unter denen dem Ergebnis der Auswertung zu trauen ist.

Einführung

Eine der Hauptaufgaben der Unfallanalyse besteht darin, die Annäherung der Fahrzeuge an den Kollisionspunkt zu rekonstruieren. Da die Fahrgeschwindigkeit eines Nutzfahrzeugs durch den Fahrtschreiber registriert wird, ist es wünschenswert, von dieser Aufzeichnung bei der Rekonstruktion Gebrauch zu machen. Wenn wir den Annäherungsvorgang eines Fahrzeugs rekonstruieren, benötigen wir die Fahrgeschwindigkeit über der Zeit – und zwar so genau wie möglich. Deshalb genügt es nicht, lediglich die Fahrgeschwindigkeit von der Diagrammscheibe abzulesen; wir müssen jedem abgelesenen Geschwindigkeitswert auch eine bestimmte Zeit zuordnen.

Im Hinblick auf diese Aufgabe sollten wir besser von der zeitpräzisen Auswertung von Diagrammscheiben sprechen, anstelle des geläufigeren Begriffs «mikroskopische Auswertung», der nur ein bestimmtes Auswertungsverfahren bezeichnet. Selbstverständlich kann zeitliche Präzision nur in Bezug zum Anfang des untersuchten Zeitintervalls erreicht wer-

den. Absolute Zeiten können der Diagrammscheibe nicht entnommen werden, da die Absolutezeit am Fahrtschreiber manuell eingestellt wird.

Obwohl Fahrtschreiber ursprünglich nicht für diesen Zweck gedacht waren, ist die zeitpräzise Auswertung in Deutschland seit Anfang der 50er Jahre gebräuchlich. Zu dieser Zeit begann Kienzle, mechanische Geräte für eine solche Auswertung zu entwickeln. Seitdem hat Kienzle mehr als 100.000 Diagrammscheiben zeitpräzise ausgewertet [1]. Ist ein Nutzfahrzeug am Unfall beteiligt, so ist es in Deutschland üblich, die Rekonstruktion des Annäherungsvorganges dieses Fahrzeugs an Kienzle oder VDO zu delegieren.

Trotz der Bedeutung dieses Verfahrens wurde seine Genauigkeit nie detailliert untersucht, bis mir Kienzle 1993 den Auftrag gab, genau dies zu tun. Dieser Aufsatz ist eine aktuelle Version meines ursprünglichen Berichts [2].

Die Auswertevorrichtung

Die Geschwindigkeit wird auf der Diagrammscheibe in einem Polarkoordinatensystem aufgezeichnet. Der Radius entspricht der Fahrgeschwindigkeit und der Drehwinkel der verstrichenen Zeit. Die mechanische Auswertevorrichtung besteht aus einem Auflichtmikroskop mit einem modifizierten Objektträger, **Abb. 1**. Die Diagrammscheibe ist auf einem Drehteller platziert, der sich

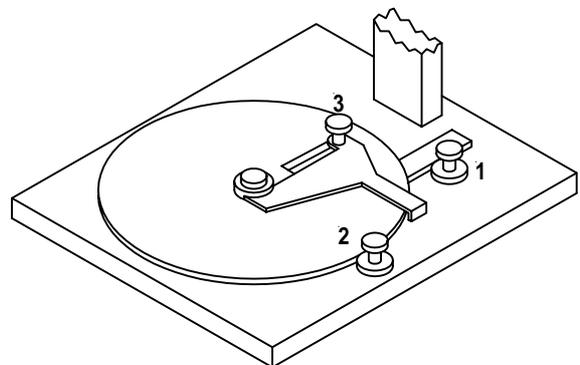


Abb.1: Modifizierter Objektträger des Auflichtmikroskops

(selbstverständlich) drehen, aber auch horizontal verschieben lässt. Die Freiheitsgrade der Bewegung des Drehtellers entsprechen also den Polarkoordinaten der Aufzeichnung.

Eine Haarlinie innerhalb des Okulars zeigt dem Betrachter die Rechtwinklige zum Radius des Drehtellers. Der Drehteller wird nun so verschoben, dass diese Haarlinie die Aufzeichnung an einem bestimmten Punkt schneidet. Die Geschwindigkeit an diesem Punkt ist dann proportional zur notwendigen Verschiebung ①.

Über dem Drehteller befindet sich eine Klarglasscheibe, in deren Rückseite eine Haarlinie eingätzt ist, die (etwa) in radiale Richtung zeigt. (Wir werden diesen Punkt später nochmals genauer aufgreifen.) Der Drehwinkel ②, der benötigt wird, um diese Haarlinie mit einem bestimmten Punkt der Aufzeichnung zum Schnitt zu bringen, entspricht der abgelaufenen Zeit. Die Orientierung dieser Haarlinie im Hinblick auf die exakt radiale Richtung kann über den Mechanismus ③ eingestellt werden. Selbstverständlich zeigt Abb. 1 eine vereinfachte Version der echten Auswerteeinrichtung.

Heutzutage sind die Stellschrauben mit Impulsgebern versehen, sodass ihre Drehstellung sofort in den Rechner eingelesen wird. Das ändert jedoch nichts daran, dass der Kern des Auswerteverfahrens weiterhin mechanisch ist. Einer der größten Nachteile der mechanischen Apparatur ist das Spiel zwischen den einzelnen Bauteilen. Hat man mit der Auswertung begonnen, so darf man den Teller nur noch in eine Richtung drehen, oder man ist gezwungen, die gesamte Auswerteprozedur von vorn zu beginnen. Der große Vorteil der Apparatur besteht allerdings darin, dass die Auswertung *in situ* stattfindet, sodass optische Verzerrungen infolge der Vergrößerung die Messung nicht beeinträchtigen.

Heutzutage mag es naheliegend erscheinen, das Auswerteverfahren zu computerisieren, indem man die Aufzeichnungslinie automatisch verfolgt. Eines der Hauptprobleme bei solcher Vorgehensweise ist die durch die

Vergrößerung verursachte Verzerrung. Diese Vergrößerung ist unumgänglich, da ein Zeitintervall von 1 s lediglich 3,4 μm auf dem 40-km/h-Radius entspricht. Dies bedeutet, dass mindestens 7500 dpi benötigt werden, um eine Auflösung von 1 s zu erzielen. Diese Auflösung kann derzeit mit normaler Hardware nur erreicht werden, wenn man die interessierenden Ausschnitte vor der Digitalisierung vergrößert.

Die Ansprechschwelle

Alle Fahrtschreiber haben eine Ansprechschwelle. Bei Fahrgeschwindigkeiten unterhalb der Ansprechschwelle verbleibt die Aufzeichnungsnadel auf dem Ruhekreis. Der genaue Wert der Ansprechschwelle hängt von der Maximalgeschwindigkeit ab, auf die der Fahrtschreiber ausgelegt ist. Der Durchmesser des Ruhekreises besitzt einen vorgegebenen Standardwert und sollte im Idealfall die Markierungen der Zeitskala soeben außen berühren. Innerhalb des ringförmigen Aufzeichnungsbereichs ist die Auslenkung der Schreibnadel dann linear proportional zur Fahrgeschwindigkeit. Durch die Markierungen wird die Diagrammscheibe in 20-km/h-Abständen in konzentrische Kreise unterteilt. Der Abstand zwischen dem Ruhekreis und dem 20-km/h-Kreis ist deshalb geringer als derjenige zwischen den übrigen Kreismarkierungen. Dieser Unterschied entspricht genau dem Wert der Ansprechschwelle.

Wenn also in der Diagrammscheibenauswertung Stillstand des Fahrzeugs angegeben ist, so entspricht dieser Geschwindigkeitswert und der zugehörige Zeitwert einer Extrapolation der tatsächlichen Aufzeichnung. Der Zeitbezug, der durch diese Extrapolation gewonnen wird, wird dann auf ganze Sekunden gerundet. Der ursprüngliche Auswertungspunkt, d.h. der Eintrittspunkt in den Ruhekreis ist nirgendwo mehr zu finden, weder in der tabellarischen Darstellung, noch in der grafischen Umsetzung.

In der Geschwindigkeitsaufzeichnung sind Fahrmanöver, deren Maximalgeschwindigkeit unterhalb der Ansprechschwelle bleibt (soge-

nannte *Schleichfahrten*) vom Stillstand des Fahrzeugs nicht zu unterscheiden. Unter bestimmten Umständen können längere Schleichfahrten anhand der Wegaufzeichnung erkannt werden. Der ringförmige Aufzeichnungsbereich für den Weg hat eine Breite von 5 mm, sodass 1 m Fahrstrecke $1\ \mu\text{m}$ in der Aufzeichnung entspricht. Eine Fahrstrecke von 40 m entspricht dann etwa der Breite der Aufzeichnungslinie. Wenn vor und nach der Schleichfahrt Phasen längerer Stillstände liegen, kann ein minimaler Unterschied in den Radien der aufgezeichneten Kreise festgestellt werden.

Die divergenten Maßstäbe

Will man den Verlauf der Geschwindigkeit über der Zeit aus der Diagrammscheibenaufzeichnung ableiten, so besteht das Hauptproblem darin, dass die Maßstäbe für die beiden aufgezeichneten Variablen stark differieren. Ein Geschwindigkeitsunterschied von 1 km/h entspricht einem Radiusunterschied von $165\ \mu\text{m}$, während ein Zeitintervall von 1 s lediglich $3,4\ \mu\text{m}$ auf dem 40-km/h-Kreis entspricht. Wenn wir also eine Geschwindigkeitsänderung von 10 km/h/s ($= 2,8\ \text{m/s}^2$) als typisches Fahrmanöver betrachten, so beträgt die Steigung der zugehörigen Fahrlinie 1:500.

Die Breite des Aufzeichnungsstrichs beträgt etwa $55\ \mu\text{m}$. Bezogen auf den Zeitmaßstab entspricht dies etwa 16 s. Dieses Zeitinkrement werden wir im Folgenden als Linienzeit bezeichnen. Auf der anderen Seite entspricht die Breite der Aufzeichnungslinie lediglich 0,3 km/h auf der Geschwindigkeitsskala.

Mit der mechanisch-optischen Auswerteeinrichtung lassen sich Zeitwerte im Abstand von etwa 0,5 s ablesen. Während des Auswerteprozesses wird die Aufzeichnungslinie durch eine Polylinie angenähert. Die Wahl der Knotenpunkte dieser Polylinie liegt im Ermessen des Auswerters. Üblicherweise werden die aus der Aufzeichnung abgelesenen Zeitwerte auf ganze Sekunden gerundet, um die Auswertung nicht genauer als sachlich gerechtfertigt erscheinen zu lassen.

Die Leitlinie

Bislang haben wir den Aufzeichnungsprozess als Realisierung eines Polarkoordinatensystems beschrieben. Es ist selbstverständlich, dass bei der praktischen Umsetzung dieses Konzepts in einem mechanischen Apparat die Führungsschiene des Aufzeichnungsstiftes nicht exakt in radiale Richtung weist. Bei der Montage des Fahrtschreibers gibt es Fertigungstoleranzen. Das bedeutet, dass selbst wenn wir die Möglichkeit hätten, die Drehung der Diagrammscheibe im Fahrtschreiber anzuhalten und lediglich die Geschwindigkeit verändern würden, diese Aufzeichnungslinie nicht exakt radial verlaufen würde.

Um die Richtung zu bezeichnen, die einer unendlich großen Beschleunigung auf der Diagrammscheibe entspricht (wenn sie bereits auf dem Drehteller montiert ist), wurde das Konzept der Leitlinie entwickelt. Die Orientierung der Leitlinie muss festgelegt werden, bevor man mit der Auswertung des Zeitintervalls vor dem Unfall beginnt. Es ist festzuhalten, dass die Leitlinie ein rein theoretisches Konzept darstellt. Ihre Orientierung kann aus den charakteristischen Eigenschaften der Aufzeichnung nicht präzise abgeleitet werden.

Innerhalb des Auswertegerätes wird die Leitlinie durch eine Haarlinie repräsentiert, die in die Rückseite der Klarglasscheibe geätzt ist. Diese Haarlinie hat eine Breite von etwa $3\ \mu\text{m}$, was etwa 1 s auf dem 40-km/h-Kreis entspricht. Der Winkel zwischen der Haarlinie und der exakt radialen Richtung kann über eine Stelleinrichtung verändert werden. Bevor der letztlich interessante Teil der Aufzeichnung (kurz vor der Kollision) ausgewertet werden kann, muss der Winkel zwischen der Haarlinie und der exakt radialen Richtung festgelegt werden. Dazu wertet man Beschleunigungs- und Bremsvorgänge aus, die vor dem eigentlich interessierenden Intervall liegen.

Am Anfang der Aufzeichnung muss sich das Innenleben des Fahrtschreibers erst einmal «setzen», damit das Spiel eliminiert wird. Deshalb braucht es einige Zeit, bevor sich die Richtung der Leitlinie stabilisiert hat. Ent-

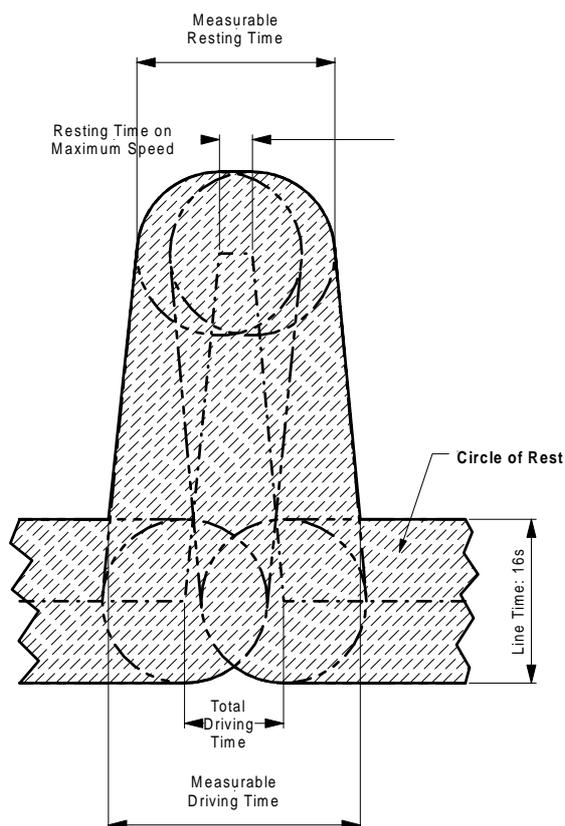


Abb. 2: Einfach überlappte Aufzeichnung

nimmt man die Diagrammscheibe aus dem Fahrtsschreiber, so zerstören dies die aktuelle Leitlinie. Nichtsdestoweniger scheinen auch krasse Verletzungen der daraus resultierenden Verhaltensregeln die Auswertung nicht notwendigerweise zu verhindern [3].

Darüber hinaus wird sich der Drehpunkt der Scheibe verändern, wenn man sie dem Fahrtsschreiber entnimmt und in der Auswertevorrichtung platziert. Selbst wenn also die Führungsschiene der Nadel im Fahrtsschreiber exakt radial in Bezug auf den Drehpunkt verlaufen würde, würde diese Richtung nicht mit der radialen Richtung in der Auswerteeinheit übereinstimmen. Der Abstand zwischen den beiden Drehpunkten wird als *Exzentrizität* bezeichnet und der daraus resultierende Fehler als *Exzentrizitätsfehler*.

Das Flankenverfahren

Die Anmerkungen zur Breite der Aufzeichnungslinie zeigen, dass die Aufzeichnung auf der Diagrammscheibe nicht als gewöhnlicher

Funktionsplot in einem (modifizierten) Polarkoordinatensystem verstanden werden kann. Normalerweise verstehen wir unter einem Funktionsplot eine akzeptable Annäherung an das mathematischen Konzepts der Kurve, die eine präzise Beziehung zwischen den zwei Koordinaten repräsentiert. Bei einer Kurve, die 16 mal breiter ist als eine der Koordinateneinheiten, müssen wir spezielle Verfahren anwenden, um zu einem eindeutigen Zusammenhang zwischen den beiden Koordinaten zu gelangen.

Wir sind also gezwungen, in der Aufzeichnung nach besseren Repräsentanten für das mathematische Konzept der Kurve zu suchen. Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten zur Lösung dieses Problems, deren gebräuchlichere darin besteht, die Kante der Aufzeichnungslinie zu verfolgen. Dabei kann man sich nach Belieben an der linken oder rechten Kante orientieren. Wenn die Beschleunigung innerhalb der Aufzeichnung das Vorzeichen wechselt, können überlappende Aufzeichnungen entstehen. Dieser Effekt tritt dann auf, wenn das Zeitintervall, in dem die Geschwindigkeit auf ihrem lokalen

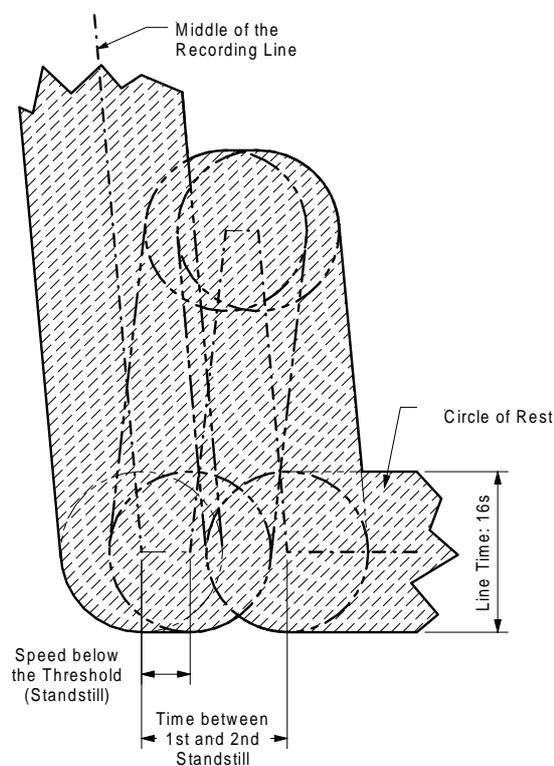


Abb. 3: Doppelt überlappte Aufzeichnung

Maximum (oder Minimum) verharnt, kürzer ist als die Breite des Aufzeichnungsstrichs.

In der Aufzeichnung **Abb. 2** ist die rechte Seite der steigenden Linie und die linke Seite der fallenden Linie nicht zu sehen. Am Gipfel muss deshalb die Bezugskante gewechselt werden. Da die Auswertung in solchem Fall auf den sichtbaren Flanken des Ausschlags basiert, werden wir dieses Verfahren im Folgenden als das *Flankenverfahren* bezeichnen. Das Zeitintervall, innerhalb dessen die Geschwindigkeit auf ihrem Maximum (Minimum) verharnt, kann dadurch bestimmt werden, dass man die die Breite des Aufzeichnungsstrichs von der Breite der Kuppe subtrahiert.

Das Auflichtverfahren

Wenn das Vorzeichen der Beschleunigung mehr als einmal während der Linienzeit wechselt, kommt zu mehrfachen Überlagerungen in der Aufzeichnung. Bei dem in **Abb. 3** dargestellten Fall sind beide Seite des ansteigenden Kurvensegments nicht zu sehen. In diesen Fällen beleuchtet man die Aufzeichnung direkt von oben. Da die Aufzeichnungslinie in die Beschichtung der Diagrammscheibe hinein gekratzt wird, hat sie in der dreidimensionalen Betrachtung die Form einer Mulde. Wird sie genau von oben belichtet, folgt die gerichtete Reflektion in das Okular hauptsächlich vom Grunde dieser Mulde, d.h. der Mittellinie der Aufzeichnung. Die Mittellinie wird also durch ihre hellere Färbung sichtbar (wegen der stärkeren Reflektion).

Beim Auflichtverfahren verknüpfen wir die Auswertung mit der Mittellinie der Aufzeichnung. Wenn wir zwischen Flanken- und Auflichtverfahren wechseln, müssen wir einen Zeitversatz in Höhe der halben Linienzeit berücksichtigen.

Fehler in der Geschwindigkeit

Die EU-Bestimmungen unterscheiden drei verschiedene Randbedingungen in Bezug auf die zulässigen Fehler in der Geschwindigkeitsaufzeichnung [4]:

- Fehler, deren Ursache im Fahrtschreiber selbst liegt, also noch bevor er in das Fahrzeug eingebaut wird
- Fehler nach dem Einbau in das Fahrzeug
- Maximaler Fehler im Betrieb zwischen den Rekalibrierungen

Diese Kategorisierung entspricht den verschiedenen Fehlerquellen:

- Unkorrekte Aufzeichnung durch den Fahrtschreiber selbst
- Fehler, die in der unvollständigen Anpassung zwischen der Wegdrehzahl des Pulsgebers und Wegdrehzahl des Fahrtschreiber bestehen
- Veränderungen des Reifenhalbholmmessers

Im Hinblick auf moderne elektronische Fahrtschreiber können wir erwarten, dass die Ablenkung der Aufzeichnungsnadel (die durch einen Stellmotor bewegt wird) linear proportional zur eingespeisten Impulsfrequenz ist. Wir haben den für unsere Experimente verwendeten Fahrtschreiber diesbezüglich getestet und festgestellt, dass die aufgezeichnete Geschwindigkeit exakt mit der im Kalibrierblatt eingetragenen Wegdrehzahl korrespondierte. Bei älteren Fahrtschreibern, die mechanisch nach dem Wirbelstromprinzip funktionieren, ergibt sich ein nichtlinearen Zusammenhang zwischen Rotation der Tachowelle und angezeigter Geschwindigkeit. Kurzum: Der erste Punkt der zitierten EU-Richtlinien zielte auf mechanische Fahrtschreiber. Diese Fehlerquelle ist bei modernen elektronischen Fahrtschreiber vernachlässigbar. Zwar kann unkorrekte Justierung des Ruhekreises immer noch einen konstanten Versatz bewirken, doch kann dieser im Rahmen der gewissenhaften Auswertung leicht subtrahiert werden.

Früher wurde die Wegdrehzahl des Getriebeausgangs über ein mechanisches Getriebe an die Wegdrehzahl des Fahrtschreiber angepasst. Es lag in der Natur der Sache, dass diese Anpassung auf vorher festgelegte Übersetzungsverhältnisse beschränkt war. Auf die

hierdurch verursachten Fehler zielt der zweite Punkt der oben zitierten Richtlinie. Heutzutage kann die Wegdrehzahl des elektronischen Fahrtschreibers präzise an die Pulsfrequenz des elektrischen Gebers am Getriebeausgang angepasst werden. Entsprechende Regelung wurde deshalb ebenfalls vom technischen Fortschritt überholt.

Der dritte Punkt der EU-Regelung zielte hauptsächlich auf Reifenverschleiß und mögliche Alterungseffekte im Fahrtschreiber. Zwar wird die Anzeigegenauigkeit eines digitalen Fahrtschreibers nicht durch Alterungseffekte beeinflusst, doch muss der Reifenverschleiß weiterhin berücksichtigt werden. Der Umfang eines abgefahrenen Lkw-Reifens ist um bis zu 2% geringer als der eines neuen Reifens. Die Änderung des Reifenradius' verursacht einen Fehler, der linear proportional zur Fahrgeschwindigkeit ist. (Das gleiche gilt übrigens im Falle inkorrekt eingestellter Wegdrehzahl.) Für elektronische Fahrtschreiber gilt also

$$\Delta v = c_v \cdot v \quad (1)$$

Bei mechanischen Fahrtschreibern, die nach dem Wirbelstromprinzip arbeiten, müssen wir nichtlineare Fehler in Betracht ziehen. Neu kalibrierte elektronische Fahrtschreiber aber zeichnen die Fahrgeschwindigkeit mit hoher Genauigkeit auf.

Fehler im Zeitbezug

Ablesefehler

Die Haarlinie selbst hat eine Breite von 1 s, sodass der Schnittpunkt zwischen der Haarlinie und der Referenzkurve (Mitte oder Flanke der Aufzeichnungslinie) nicht genau definiert ist. Die Kanten der Aufzeichnungslinie sind darüber hinaus leicht «ausgefranst», weil die Aufzeichnung durch mechanische Abschabung entsteht, vergleichbar wie bei alten Phonographen. Minderwertige Diagrammscheiben können eine zeitpräzise Auswertung auch gänzlich verhindern, da das «spröde» Material der Registrierschicht an den Seiten der Mulde wegbriecht.

Der Ablesefehler ist stochastischer Natur; er kann sein Vorzeichen wahllos zwischen den verschiedenen Stützstellen der Aufzeichnung ändern. Wir können zwar vermuten, dass eine gewisse Korrelation zwischen den Ablesefehlern an aufeinander folgender Stützstellen besteht. Wir sind jedoch nicht in der Lage, den Grad dieser Korrelation mit theoretischen Mitteln vorauszusagen. Solche Teile der Auswertung, die über das Auflichtverfahren ausgewertet wurden, ist der Ablesefehler größer als bei solchen, die über das Flankenverfahren ausgewertet wurden.

Verschiebung der Referenzkurve

Wenn eine einfache Überlappung den Auswerter zu einem Flankenwechsel zwingt, beispielsweise von der linken zur rechten Flanke der Aufzeichnungslinie, so muss die Linienzeit (16 s) berücksichtigt werden. Dieser Zeitversatz ist mehrfach größer als die angestrebte Genauigkeit. Deshalb erzeugen bereits geringe prozentuale Fehler zwischen der angenommenen und der tatsächlichen Linienzeit einen bedeutsamen Zeitversatz. Der analoge Effekt tritt auf, wenn man zwischen Flanken- und Auflichtverfahren wechselt. In diesem Fall entspricht der Zeitversatz der halben Linienzeit.

Verhärtungen in der Registrierschicht

Im Idealfall besitzt die Aufzeichnungsschicht der Diagrammscheibe eine konstante Viskosität über der gesamten Fläche. In der Praxis treffen wir jedoch auf lokale Verhärtungen in der Registrierschicht, insbesondere bei kostengünstigen Diagrammscheiben. Diese lenken die Aufzeichnungsnadel in Richtung des weicheren Materials ab. Diese Abweichungen können fehlinterpretiert werden, entweder als Geschwindigkeitsänderungen oder als kollisionsbedingte Ausschläge.

Scherung der Leitlinie

Die Orientierung der idealen Leitlinie entspricht der imaginären Linie, die bei unendlich hoher Beschleunigung gezeichnet würde. Aus diesem Grunde sollte die Haarlinie (als

ihr Pendant in der realen Welt) eine möglichst hohe Beschleunigung repräsentieren. Die Güte der Haarlinie kann also durch die Beschleunigung a_c ausgedrückt werden, für die sie steht. Schräglage der Leitlinie erzeugt einen Fehler im Zeitbezug, der proportional zur Fahrgeschwindigkeit ist. Für den zeitlichen Fehler zwischen zwei beliebigen Stützstellen – i, j – erhalten wir

$$\Delta t = \frac{v_i - v_j}{a_c} \quad (2)$$

Der Fehler betreffend die Gesamtfahrzeit ist deshalb proportional zum Geschwindigkeitsunterschied zwischen Beginn und Ende des gesamten Fahrmanövers. Dies bedeutet insbesondere, dass falls die Geschwindigkeiten am Anfang und Ende des ausgewerteten Zeitraums identisch sind (z.B. beide Null), die Schiefe der Leitlinie keinen Fehler in der ausgewerteten Gesamtfahrzeit zur Folge hat.

Die Gesamtfahrstrecke kann durch mehrfache Anwendung der Trapezregel berechnet werden

$$s = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{n-1} (v_k + v_{k+1}) \cdot (t_{k+1} - t_k) \quad (3)$$

Der Fehler ist also

$$\begin{aligned} \Delta s &= \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{n-1} (v_k + v_{k+1}) \cdot (\Delta t_{k+1} - \Delta t_k) \\ &= \frac{1}{2 a_c} \sum_{k=0}^{n-1} (v_k + v_{k+1}) \cdot (v_{k+1} - v_k) \\ &= \frac{1}{2 a_c} \sum_{k=0}^{n-1} (v_{k+1}^2 - v_k^2) \end{aligned} \quad (4)$$

Durch die Subtraktion innerhalb des Summenterms löschen sich alle Geschwindigkeiten bis auf die erste und letzte wechselseitig aus, sodass lediglich

$$\Delta s = \frac{v_n^2 - v_0^2}{2 a_c} \quad (5)$$

verbleibt. Wie die Gesamtfahrzeit wird also auch die Gesamtfahrstrecke fehlerfrei berech-

net, wenn die Geschwindigkeiten am Anfang und Ende des ausgewerteten Bereichs identisch sind. So werden insbesondere Start-Stopp-Vorgänge durch die Scherung der Leitlinie nicht beeinflusst.

Exzentrizität

Der Exzentrizitätsfehler unterscheidet sich etwas von der «normalen» Schiefe. Die Exzentrizität hat zur Folge, dass die Leitlinie ihre Richtung bei einer vollen Umdrehung in Form einer Sinusfunktion ändert [5]. Da das ausgewertete Zeitintervall üblicherweise aus nur wenigen Sekunden besteht, kann die Orientierung der Leitlinie über diesem Intervall weiterhin konstant angenommen werden.

Wir sollten allerdings im Blick behalten, dass die Orientierung der Leitlinie normalerweise an anderer Stelle aus der Aufzeichnung ermittelt wird, üblicherweise eine gewisse Zeit vor der Kollision. Wegen der möglichen Exzentrizität sollte die Leitlinie so nah wie möglich am ausgewerteten Zeitraum bestimmt werden, ohne dass dieser tatsächlich enthalten ist. Da die Leitlinie durch den Vergleich von Anfahrbeschleunigungen und Bremsverzögerungen ermittelt wird, ist diese Forderung bei Autobahnunfällen in der Regel nicht zu erfüllen.

Fahrversuche

Versuchsaufbau

Die grundlegende Idee bestand darin, eine Referenzmessung aufzuzeichnen, mit der die ausgewerteten Verläufe anschließend verglichen werden konnten. Wir maßen daher den Radrehwinkel mittels einer Reflexlichtschranke, die auf der Reifenflanke aufgeklebte Streifen zählte, d.h. wir maßen – wie der Fahrtschreiber – den zurückgelegten Reifenumfangsweg. Diese Vorgehensweise garantierte, dass Abweichungen zwischen dem Referenzschrieb und dem ausgewerteten Verlauf einzig auf Fehler im Fahrtschreiber selbst bzw. in der Auswerteprozedur begründet waren, da andere Fehlerquellen ausgeschlossen sind.

Mit den Pulsen der Reflexlichtschranke dekrementierten wir einen elektronischen Zähler, dessen Zählstand von einem Computer in konstanten Zeitintervallen eingelesen wurde. Auf diese Weise zeichneten wir den Weg über der Zeit auf, während der Fahrtschreiber die Geschwindigkeit über der Zeit registriert. Da wir uns in der Unfallrekonstruktion üblicherweise für die aus der Aufzeichnung gewonnenen Weg-Zeit-Zusammenhänge interessieren, schien ein solcher Referenzschrieb der geeignetste. Auf der anderen Seite können wir aus unserer Aufzeichnung durch einmaliges Differenzieren direkt die Geschwindigkeit ableiten.

Konzeption des Experiments

Wir absolvierten zwei Testfahrten mit jeweils fünf Minuten Gesamtfahrzeit. Der Auswerter wurde angewiesen, nur den sichtbaren Teil der Aufzeichnung auszuwerten und auf die übliche Extrapolation auf den Stillstand zu verzichten. Die Auswertung bezieht sich deshalb auf Fahrgeschwindigkeiten oberhalb von 7 km/h, der Ansprechstelle des verwendeten Fahrtschreibers. Entsprechend beziehen sich die «Haltezeiten» auf das Zeitintervall, in dem sich die Aufzeichnungsnadel auf dem Ruhkreis bewegte.

- Flankenverfahren
Die Haltezeit zwischen den Einzelfahrten war in der Mehrzahl der Fälle länger als die Linienzeit. Die Fahrzeit der Einzelfahrten war allerdings üblicherweise kürzer als die Linienzeit. Die meisten Testfahrten konnten daher nach dem Flankenverfahren ausgewertet werden.
- Auflichtverfahren
Für den Fall, dass die Haltezeit kürzer als die Linienzeit ist, erhalten wir mehrfache Überlappungen. Dieser Effekt trat bei einer Reihe von Doppelfahrten auf.
- Schleichfahrten

In zwei Fällen streuten wir Schleichfahrten ein. Diese waren 30,6 m und 18,05 m lang.

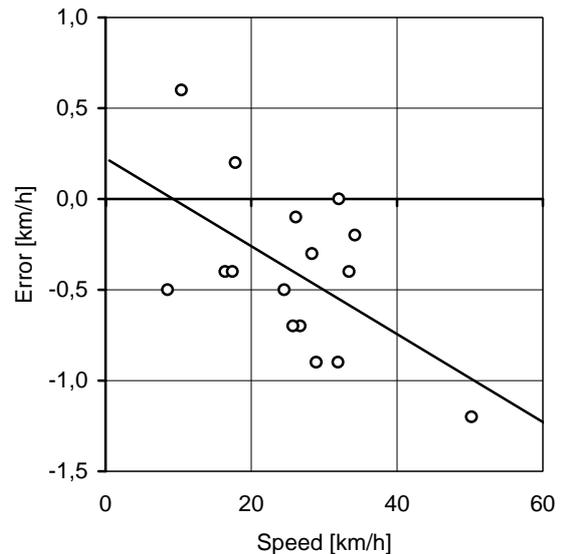


Abb. 4: Auswertefehler: Maximalgeschwindigkeit

Maximalgeschwindigkeit

Abb. 4 vergleicht die ausgewertete Maximalgeschwindigkeiten mit der denen aus unserer Referenzaufzeichnung. Die Datenbasis enthält alle 16 Einzelfahrten, wobei die eingezeichnete Linie über lineare Regression gewonnen wurde. Alle Fehler fallen in ein $\pm 0,5$ -km/h-Band um den allgemeinen Trend. Dies ist die Fehlergrenze, die wir beim Runden auf volle km/h-Werte erwarten. Der durch die lineare Regression veranschaulichte allgemeine Trend entspricht dem durch den Fahrtschreiber verursachten Fehler, dessen angezeigte Geschwindigkeit 2% unterhalb der tatsächlichen liegt.

Gesamtfahrzeit

Abb. 5 zeigt den Fehler in der ausgewerteten Gesamtfahrzeit. Einzelfahrten, die mit der Flankenmethode ausgewertet werden konnten, sind durch weiße Datenpunkte markiert. Doppelfahrten sind durch ausgefüllte Punkte gekennzeichnet, die mit einer Linie verbunden sind. Die Zahlen bezeichnen die Nummer des Fahrmanövers.

Bei den Fahrmanövern, die über das Flankenverfahren ausgewertet werden konnten, fallen die Fehler in einen Bereich von -1 s $-$ $+2$ s. Die allgemeine Tendenz, die Fahrzeit zu ü-

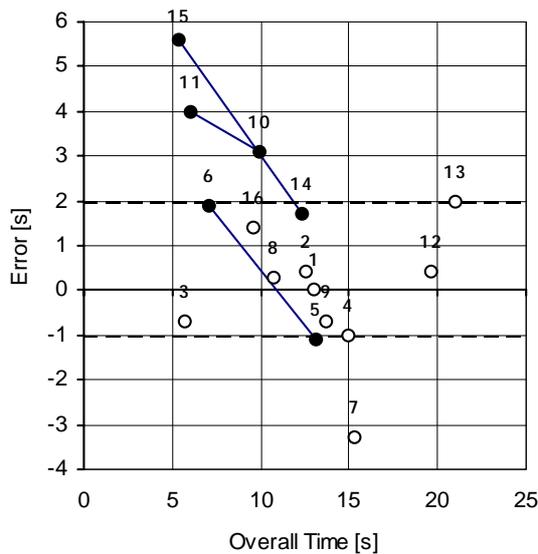


Abb. 5: Auswertefehler: Gesamtfahrzeit

berschätzen, ist möglicherweise in einer Unterschätzung der Linienzeit begründet. Der maximale Fehler von -3,3 s trat beim Fahrmanöver Nr. 7 auf. Bei diesem Fahrmanöver betrug die Maximalgeschwindigkeit 16 km/h und sowohl Anfahrbeschleunigung als auch Bremsverzögerung lagen unterhalb der Werte für die anderen Fahrmanöver. Da der Maximalwert die Ansprechschwelle nur um 9 km/h überstieg, war die Steigung an den Flanken schwer abzuschätzen. Der Auswerter wurde deshalb möglicherweise durch die übrigen Fahrmanöver in die Irre geführt und das Runden auf volle Sekunden gab dann den Rest.

Wenn wir die Doppelfahrten betrachten, so fällt auf, dass die ausgewerteten Gesamtfahrzeiten deutlich länger sind als in unserem Referenzschrieb. Insbesondere die Fahrzeiten für den zweiten Teil der Doppelfahrten überstiegen die von uns aufgezeichneten Werte beträchtlich. Unglücklicherweise setzte der Auswerter den Bezugszeitpunkt der Auswertung für jedes einzelne Fahrmanöver zurück, mit der Folge, dass wir die Doppelfahrten in zwei ausgewertete Einzelfahrten zerfielen und deshalb nicht als Ganzes mit dem Referenzschrieb verglichen werden konnten. Beschleunigungen und Verzögerungen an den sichtbaren Flanken wurden mit der gleichen Genauigkeit wie bei den Einzelfahrten ausgewertet. Dies lässt vermuten, dass die Ge-

samtfahrzeit, d.h. die während beider Einzelfahrten verstrichene Zeit, inkl. des dazwischenliegenden Stillstandes, mit der gleichen Genauigkeit ausgewertet worden wäre wie für die Einzelfahrten. Dementsprechend müsste die Stillstandszeit zwischen den beiden Einzelfahrten zu kurz geraten sein. Der Fehlbeitrag scheint bevorzugt dem zweiten Anfahrmanöver zugeschlagen zu werden, mit der Folge, dass die Anfahrbeschleunigung deutlich zu niedrig liegt.

Verlauf

Die **Abb. 6 – 9** vergleichen unseren Referenzschrieb mit verschiedenen Auswertungen. Da der Zeitbezug vom Auswerter bei jeder Fahrt neu gesetzt wurde, gibt es keinen eindeutigen Weg, die ausgewerteten Verläufe und die Referenzschriebe zu überlagern. Unsere Darstellung ist so gewählt, dass sich in der Bewertung des Gesamtfahrverlaufs maximale Übereinstimmung ergibt.

Abb. 6 zeigt den hohen Grad an Übereinstimmung, der sich im günstigsten Fall einstellen kann. Anfahrbeschleunigung und Abbremsung zeigen eine beeindruckende Übereinstimmung mit unserem Referenzschrieb. Darüber hinaus bemerkte der Auswerter den durch den Schaltvorgang verursachten Ein-

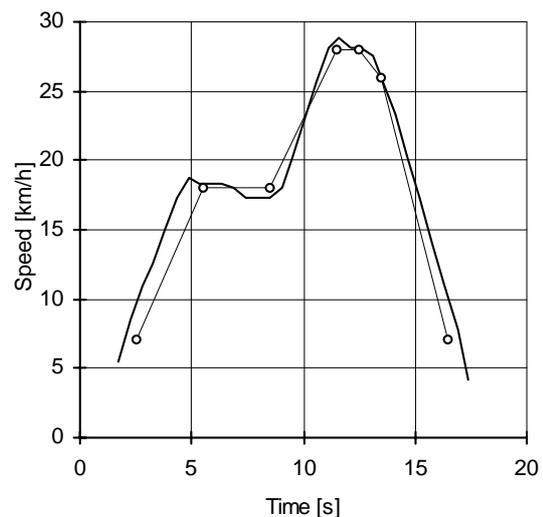


Abb. 6: Beispiel für zufriedenstellende Übereinstimmung

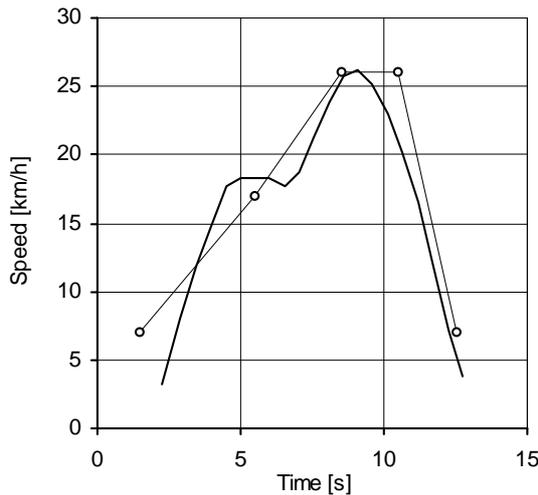


Abb. 7: Beispiel für mittelmäßige Übereinstimmung

bruch in der Anfahrbeschleunigung und fügte in diesem Bereich zwei Stützpunkte ein.

Auf der anderen Seite gibt es Fahrmanöver, die wenig Übereinstimmung mit unserem Referenzschieb zeigen, **Abb. 7**. Obwohl der Auswerter die Unregelmäßigkeit in der Anfahrbeschleunigung erkannte und einen Stützpunkt einfügte, zeigt der ausgewertete Verlauf wenig Übereinstimmung mit dem Referenzschieb.

Selbst zufriedenstellende Übereinstimmung in Gesamtfahrzeit und -strecke garantiert nicht, dass die Form der ausgewerteten Kurve derjenigen des Referenzschiebs ähnelt, **Abb. 8**. Wenn wir allerdings den ausgewerteten Verlauf um einen geeigneten Winkel scheren, so erhalten wir wiederum zufriedenstellende Übereinstimmung mit unserem Referenzschieb. Dies ist ein gutes Beispiel dafür, wie eine gescherte Leitlinie die Auswertung beeinflusst. Die durchgezogene Linie mit den hohlen Datenpunkten zeigt das tatsächliche Auswertergebnis. Die gestrichelte Linie mit den vollen Datenpunkten ergibt sich, wenn die Auswertung um 4 m/s^2 geschert wird. Ähnlich niedrige Werte für die charakteristische Beschleunigung wurden bei der Auswertung der Fahrmanöver 2 und 13 festgestellt. Für alle anderen Fahrmanöver war der durch Scherung erzeugte zusätzliche Fehler im Bereich von etwa 1 s pro 50 km/h , was ei-

ner charakteristischen Beschleunigung von 15 m/s^2 entspricht.

Wenn wir das Auswertergebnis für die Doppelfahrten mit unserem Referenzschieb vergleichen, zeigen sich deutliche Abweichungen. Als ein Beispiel zeigt **Abb. 9** den zweiten Teil der Doppelfahrt 14/15. Die Abbremsung am Ende der Fahrt konnte mit dem Flankenverfahren ausgewertet werden. Wie erwartet, wird zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen ausgewerteten und tatsächlichem Wert erzielt. Die davor liegenden ansteigenden Flanke musste mit dem Auflichtverfahren ausgewertet werden. Der Zeitversatz, der mit dem Wechsel zwischen Auflicht- und Flankenverfahren verbunden ist, wurde jedoch nicht korrekt ermittelt, sodass die Kuppe $2,5 \text{ s}$ zu breit geriet. Auf dem Ruhkreis beträgt der Fehler im Zeitbezug dann $5,5 \text{ s}$. (Obwohl wir hier sozusagen gegen die Zeitrichtung argumentieren, erfolgte die Auswertung selbstverständlich wie gewohnt in positiver Zeitrichtung.)

Schleichfahrten

Die beiden Schleichfahrten, bei denen die Geschwindigkeit die Ansprechschwelle nicht überstieg, wurden nicht festgestellt, obwohl die zurückgelegte Fahrstrecke in einem Fall mehr als 30 m betrug und der Auswerter über die Testsituation informiert war. Die Ursache ist

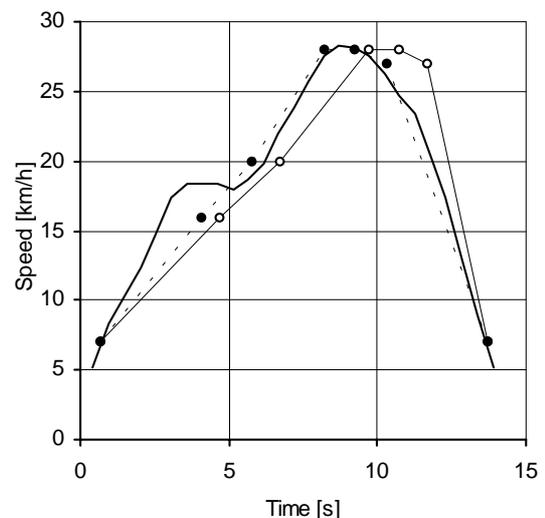


Abb. 8: Einfluss der Scherung

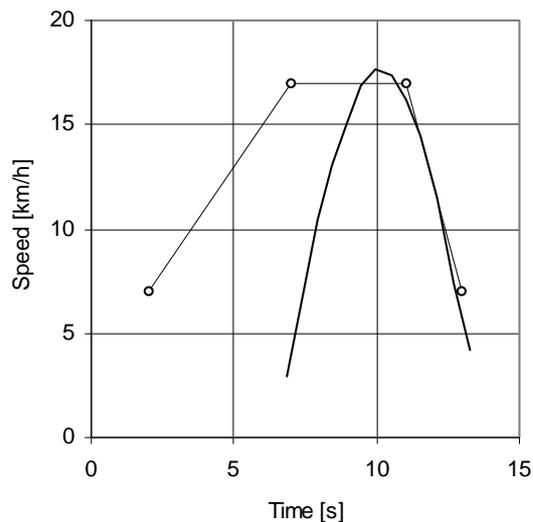


Abb. 9: Unzureichende Übereinstimmung bei der Auflichtmethode

wahrscheinlich in zu kurzer Stillstandszeit vor und hinter der Schleichfahrt zu suchen.

Schlussfolgerungen

Theoretische Überlegungen zeigen ebenso wie die experimentellen Ergebnisse, dass das Hauptproblem der Diagrammscheibenauswertung in der Zeitkoordinate liegt. Im Gegensatz dazu sind die Fehler bezüglich der Geschwindigkeitskoordinaten deutlich niedriger als die EU-Regelung suggeriert. Der Geschwindigkeitsfehler elektronischer Fahrtsschreiber ist eher proportional zur Fahrgeschwindigkeit. Ein falscher Durchmesser des Ruhekreises hingegen kann bei der exakten Auswertung problemlos berücksichtigt und kompensiert werden. Die in der EU-Regelung festgelegten absoluten Fehlergrenzen sind also eher irreführend.

Wurden die Fahrten nach dem Flankenverfahren ausgewertet, so stimmten Auswertung und Referenzschrieb teilweise sehr gut überein. Im Gegensatz dazu erzielte das Auflichtverfahren in der Regel nur unbefriedigende Ergebnisse. Die Ursache für diesen Befund ist nicht definitiv klar. Entweder ist die Mitte des Mulde nicht mit der erforderlichen Genauigkeit definiert oder die Aufzeichnungsnadel wird in Richtung der bereits bestehenden Mulde (von der fallenden Flanke) abgelenkt. Ist die Stillstandszeit nicht größer als die Li-

nienzeit, sollten Anfahrmanöver nicht für Rekonstruktionszwecke ausgewertet werden.

Es ist erstaunlich, welche Übereinstimmung zwischen der Wahl der Stützstellen und Unregelmäßigkeiten im Aufschrieb besteht. Der Gangwechsel wurde stets mit einer zusätzlichen Stützstrecke berücksichtigt.

Die Scherung der Leitlinie führt zu weiteren Fehlern im Auswerteprozess. Bei der Justierung der Haarlinie macht der Auswerter implizit Annahmen über «vernünftige» Anfahrbeschleunigungen und Bremsverzögerungen. Fehlerhafte Annahmen können zu deutlicher Scherung führen. Die Scherung der Leitlinie hat allerdings keinen Einfluss auf die Gesamtfahrstrecke zwischen Start und Stopp.

Ungenügende Fahrzeit vor dem eigentlichen Auswertintervall, Öffnen des Fahrtsschreibers oder lange Fahrten ohne Stopp behindern das korrekte Einstellen der Leitlinie.

Schleichfahrten können nur dann entdeckt werden, wenn sie von längeren Stillständen eingerahmt werden. Wenn man eine Schleichfahrt vermutet, sollte man sich also den Wegschrieb genau anschauen, bevor man die Scheibe zur Auswertung wegschickt.

Literatur

- [1] Lehmann, H.:
Die mikroskopische Diagrammscheibenauswertung für die Unfallrekonstruktion. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 30 (1992), pp. 2 – 4.
- [2] Hugemann, W.; Lehmann, H.:
Die zeitpräzise Auswertung von Diagrammscheiben – Analyse/ Toleranzen/ Versuche. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 32 (1994), pp. 241–248
- [3] Hansen, R.; Diederichsen O.:
Reaktionspunktbestimmung auf Grundlage der mikroskopischen Diagrammscheibenauswertung. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 35 (1997), pp. 43 – 65.
- [4] EWG 3821/85
- [5] Galle, R.:
Ein Beitrag zur Genauauswertung von Fahrtsschreiberdiagrammen, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 75 (1973), pp. 46 – 49.

Dieser Artikel ist die Übersetzung des englischsprachigen Tagungsbeitrags zur ITAI Konferenz 19.11. – 21.11.1999 in Telford, GB. Diese Konferenz findet alle zwei Jahre in England statt. Das Layout orientiert sich an dem des Originalbeitrags.

ITAI =
Institute of Traffic Accident Investigators
(www.itai.org)