

Verkehrskybernetik I: Automatische Bremse

Von D. MUSZKA und E. VIDA

Der gewöhnliche Ausdruck für die Verkehrsmenge ist

$$N = \frac{3600v}{L}, \quad (1)$$

wobei N die Zahl der durchfahrenden Kraftfahrzeuge [n/St], v die Geschwindigkeit der Kraftfahrzeuge [m/sec], und L [m] der Abstand zwischen den Kraftfahrzeugen ist.

Dieser Ausdruck, der in der Verkehrsforschung oft angewandt wird, enthält implizite solche Zusammenhänge, deren Erkenntnis nur durch weitere Interpretationen ermöglicht wird.

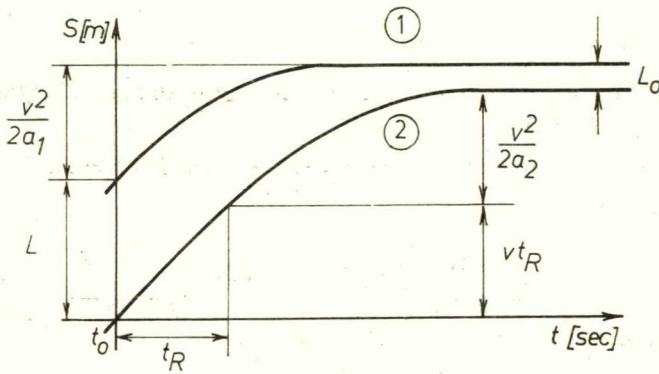


Abb. 1

Das Kraftfahrzeug ① fährt vorn und im Abstand L folgt ihm das Kraftfahrzeug ②. Wir nehmen an, daß sich alle zwei Kraftfahrzeuge mit derselben Geschwindigkeit v gleichförmig bewegen. ① beginnt im Zeitpunkt t_0 zu bremsen Abb. 1. Nach t_R (Reaktionszeit) beginnt auch ② zu bremsen. Nehmen wir an, daß alle zwei bis zum Stoppen sich gleichmäßig verlangsamen. Es sei L_0 der Abstand zwischen den schon gestoppten Kraftfahrzeugen.

Aus dem Abb. 1 ergibt sich unmittelbar der folgende Ausdruck für L .

$$L = vt_R + \frac{v^2}{2a_2} + L_0 - \frac{v^2}{2a_1}, \quad (2)$$

wobei a_1 die Beschleunigung [m/sec²] des Kraftfahrzeuges ① und a_2 die Beschleunigung [m/sec²] des Kraftfahrzeuges ② ist.

L eingesetzt in (1) ergibt:

$$N = \frac{3600 v}{L_0 + vt_R + \frac{v^2}{2} \left(\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} \right)} \quad (3)$$

Die Effektivität der Bremskonstruktion eines mit der Verzögerung a [m/sec²] bremsenden Kraftfahrzeuges ist

$$\eta = \frac{a}{a_{\max}},$$

wobei $a_{\max} = \mu g$, die größte prinzipiell erreichbare Verzögerung (μ ist der Reibungskoeffizient, g ist die Gravitationsverzögerung) ist.

Somit ist $a = \eta \mu g$; d.h. $a_1 = \eta_1 \mu g$ und $a_2 = \eta_2 \mu g$, wobei η_1 die Effektivität der Bremskonstruktion des Kraftfahrzeuges ① und η_2 die Effektivität der Bremskonstruktion des Kraftfahrzeuges ② ist. Setzt man diese Ausdrücke in (3) ein, so erhält man

$$N = \frac{3600 v}{L_0 + vt_R + \frac{v^2}{2\mu g} \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 \eta_2}} = \frac{3600 v}{L_0 + vt_R + v^2 c}, \quad (4)$$

mit der Abkürzung $c = \frac{1}{2\mu g} \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 \eta_2}$.

Es sei v_{opt} die Geschwindigkeit, bei der die Permeabilität des Straßenstreifens den Maximalwert annimmt.

Wir wollen v_{opt} bestimmen, darum müssen wir den Differentialquotienten $\frac{dN}{dv}$ gleich 0 setzen.

$$\frac{dN}{dv} = 3600 \frac{L_0 + vt_R + v^2 c - v(t_R + 2vc)}{(L_0 + vt_R + v^2 c)^2} = 3600 \frac{L_0 - v^2 c}{(L_0 + vt_R + v^2 c)^2} = 0. \quad (5)$$

Damit ergibt sich

$$L_0 - v^2 c = 0. \quad (6)$$

Diese Gleichung hat reelle Lösungen nur dann, wenn $c > 0$, d.h. wenn $\eta_1 > \eta_2$ ist. (Im Falle $\eta_1 \leq \eta_2$ ist in (5) der Dividend immer > 0 , also $\frac{dN}{dv} > 0$, d.h. N wächst streng monoton mit v , wir können also nicht von v_{opt} sprechen. Jedoch kann der Fahrer des Kraftfahrzeuges ② nicht wissen, was für eine Effektivität die Bremskonstruktion des Kraftfahrzeuges ①, das vor ihm fährt, hat, deshalb soll er — sicherheitshalber — mit dem für ihn ungünstigeren Fall $\eta_1 > \eta_2$ rechnen.)

Dann hat man

$$v_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{L_0}{c}} = \sqrt{2\mu g L_0 \frac{\eta_1 \eta_2}{\eta_1 - \eta_2}}. \quad (7)$$

Wir müssen zeigen, daß N für diesen Wert von wirklich den Maximalwert annimmt. Dies ergibt sich daraus, daß infolge von (5)

$$\begin{aligned} \frac{d^2 N}{dv^2} &= 3600 \frac{(-2vc)(L_0 + vt_R + v^2c)^2 - 2(L_0 - v^2c)(L_0 + vt_R + v^2c)(t_R + 2vc)}{(L_0 + vt_R + v^2c)^4} = \\ &= -7200 \frac{vc(L_0 + vt_R + v^2c) + (L_0 - v^2c)(t_R + 2vc)}{(L_0 + vt_R + v^2c)^3}, \end{aligned}$$

also in dem Fall $v = v_{\text{opt}}$ wegen (6) und infolge von unserer Voraussetzung $c > 0$

$$\frac{d^2 N}{dv^2} = -7200 \frac{vc(L_0 + vt_R + v^2c)}{(L_0 + vt_R + v^2c)^3} = -7200 \frac{vc}{(L_0 + vt_R + v^2c)^2} < 0$$

gilt. (7) eingesetzt in (4) ergibt mit Rücksicht darauf, daß in dem Fall $v = v_{\text{opt}}$ wegen

(6) $v^2c = L_0$ und somit $\frac{L_0}{v} = vc$ gilt

$$\begin{aligned} N_{\text{max}} &= 3600 \frac{v_{\text{opt}}}{L_0 + v_{\text{opt}}t_R + L_0} = 3600 \frac{v_{\text{opt}}}{2L_0 + v_{\text{opt}}t_R} = 3600 \frac{1}{\frac{2L_0}{v_{\text{opt}}} + t_R} = \\ &= \frac{3600}{t_R + 2v_{\text{opt}}c} = \frac{3600}{t_R + 2c\sqrt{\frac{L_0}{c}}} = \frac{3600}{t_R + \sqrt{4L_0c}} = \frac{3600}{t_R + \sqrt{\frac{2L_0}{\mu g} \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 \eta_2}}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Der Fahrer des Kraftfahrzeuges ② soll mit dem Fall rechnen, der für ihn ungünstig ist, d.h. daß die Effektivität der Bremskonstruktion des Kraftfahrzeuges ① den Maximalwert $\eta_1 = 1$ hat.

Zur Abkürzung sei $\eta_2 = \eta$, und wir setzen in den Ausdrücken (7) und (8) die gewöhnlichen Werte von L_0 und g ein (es sei $L_0 = 5$ m und $g = 10$ m/sec²). Dann bekommen wir

$$v_{\text{opt}} = 10 \sqrt{\mu \frac{\eta}{1 - \eta}} = 10 \sqrt{\mu} \sqrt{\frac{\eta}{1 - \eta}} \quad (9)$$

und

$$N_{\text{max}} = \frac{3600}{t_R + \frac{1}{\sqrt{\mu}} \sqrt{\frac{1 - \eta}{\eta}}} \quad (10)$$

Der Ausdruck (10) ist ein bemerkenswertes Ergebnis. Hieraus ersieht man unmittelbar, daß die Permeabilität eines Straßenstreifens von der Reaktionszeit, dem Reibungskoeffizienten und von der Effektivität der Bremskonstruktionen abhängt.

Im allgemeinen nehmen wir für t_R den Wert 1 sec an. (Nach allen Verfassern.) Der gewöhnliche Wert für η ist 0,75. Somit hat man in dem Nenner des Ausdrucks (10) eine Summe der Gestalt

$$t_R + p = 1 + p, \quad \text{mit } 0 < p < 1.$$

Die Grundfrage der Verkehrstechnik ist heute die: Wie kann man die Permeabilität der Straßen erhöhen? D.h. Wie kann man den Wert p vermindern?

Bisher bemühte man sich immer p zu vermindern. (Z. B. in der neuesten Straßenbautechnik, in der Reifenerzeugung und im Kraftfahrzeugbau.) Darum war das Augenmerk immer nur auf p gerichtet, weil man den Eindruck hatte, daß man t_R — als subjektiven Parameter — niemals eliminieren kann.

Der Ausdruck (10) gab uns die Idee, ein System zu konstruieren, das in bestimmten Fällen, im richtigen Zeitpunkt und im richtigen Maß maschinell (d.h. ohne Hilfe des Fahrers) zu bremsen gestattet, natürlich ohne t_R . Mit Hilfe eines solchen Systems könnte man den Wert N bedeutend erhöhen.

Im folgenden stellen wir unsere Betrachtungen über ein solches System dar.

Der Fahrer des Kraftfahrzeuges ② wird eine visuelle Information von 1 bit von der Bremslampe des Kraftfahrzeuges ① bekommen, sobald der Fahrer des Kraftfahrzeuges ① zu bremsen beginnt. Es gibt keine weiteren Informationen über die Intensität der Verzögerung. Das ist vielleicht der größte Fehler der gegenwärtigen Bremskonstruktionen! Das Nervensystem des Fahrers des Kraftfahrzeuges ② wird nur einen „Startimpuls“ von der Bremslampe des Kraftfahrzeuges ① bekommen, und von diesem Zeitpunkt an muß er auch zu bremsen beginnen und dabei beobachten, wie der Abstand zwischen den zwei Kraftfahrzeugen sich vermindert, um dementsprechend entweder stärker oder schwächer zu bremsen und so den richtigen Abstand L_0 einstellen zu können.

Es ist bemerkbar, daß diese Tätigkeit im menschlichen Nervensystem — im allgemeinen im menschlichen Körper — ein Regelungsprozeß ist. Wir können diesen Regelungsprozeß in einer anderen, maschinellen Konstitution simulieren, die im folgenden kurz zusammengefaßt werde.

Es sei im Kraftfahrzeug ① als Signalquelle ein Sender mit einer Grundfrequenz etwa im Bereich von 1000 MHz und hinten auf dem Kraftfahrzeug eine Senderantenne mit einer Nadelcharakteristik angebracht. Entsprechend sei im Kraftfahrzeug ② ein Empfänger und vorn eine Empfängerantenne untergebracht. Damit haben wir einen Signalkanal, mit dem die „Startimpulse“ in irgendeiner Kodierung übertragen werden können. Der Empfänger des Kraftfahrzeuges ② wird auf den „Startimpuls“ hin einen „Bremsbefehl“ für einen geeigneten Bremsservomechanismus geben. Dabei hat man aber nur eine Einheitsinformation (1 bit).

Im folgenden dürfen wir natürlich nicht an eine „strenge“ Simulation der menschlichen Tätigkeit denken; z. B. daran, daß der Abstand zwischen den zwei Kraftfahrzeugen und dessen Änderung mit einem Radarsystem oder mit einem Ultraschallsystem gemessen wird. Dieses wäre nur sehr kompliziert und kostspielig durchzuführen. Aber wir müssen den Ausdruck (3) beachten: Dort haben die Beschleunigungen a_1 und a_2 eine wichtige Rolle gespielt, die nun eine Idee für eine Lösung geben.

Wir müssen im Kraftfahrzeug ① dessen Verzögerung a_1 messen. Das Meßgerät soll ein Analogausgangssignal geben, durch das der Sender moduliert wird. So können wir alle Informationen über den Bremsprozeß des Kraftfahrzeuges ① in den Empfänger des Kraftfahrzeuges ② übertragen. Wir werden also an dem Ausgang des Empfängers des Kraftfahrzeuges ② das Analogsignal der Verzögerung a_1 praktisch gleichzeitig bekommen.

Der Bremsservomechanismus des Kraftfahrzeuges ② kommt nach dem „Bremsbefehl“ in Betrieb. Dementsprechend wird das Kraftfahrzeug ② auch eine — wachsende — Verzögerung a_2 haben. Wir müssen auch diesen Wert (ebenso, wie den Wert a_1) messen. Das Meßgerät soll auch hier ein Analogausgangssignal geben.

Also haben wir an dem Ausgang des Empfängers ein Analogsignal für den Wert a_1 und an dem Ausgang des Meßgeräts ein Analogsignal für den Wert a_2 . Diese zwei Signale werden mit Hilfe eines Differentialverstärkers verglichen.

Der Bremsservomechanismus soll solange im Betrieb bleiben, also die Bremskraft erhöhen, bis an dem Ausgang des Differentialverstärkers das Signal den Wert Null erreicht. Dieser Wert bedeutet, daß alle beiden Kraftfahrzeuge gleichwertige und gleichzeitige Verzögerung haben, daß sich also der Abstand zwischen den Kraftfahrzeugen bis zum Stop nicht mehr ändern wird.

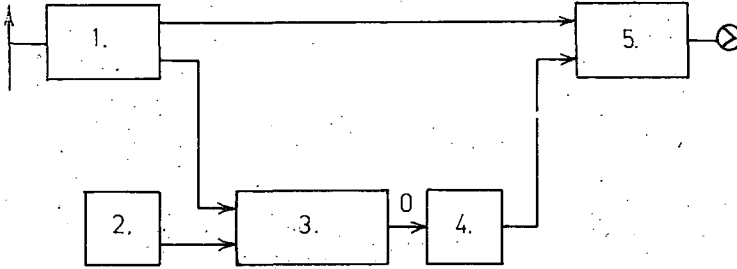


Abb. 2

- 1. Empfänger,
- 2. Meßgerät für Verzögerung,
- 3. Differentialverstärker,
- 4. Auf „0“-Wert prüfender Stromkreis,
- 5. Bremsservomechanismus.

Bei diesem Schema nahmen wir an, daß die Funktionen $a_1(t)$ und $a_2(t)$ streng monoton wachsende Funktionen sind und die hintereinanderfahrenden Kraftfahrzeuge immer bis zum Stop bremsen werden. Aber in der Praxis kann sich bei einem Bremsprozeß der Wert der Verzögerung erhöhen und vermindern und das Ende eines Bremsprozesses ($a_1=0$) bedeutet nicht unbedingt Stop. Deshalb müssen wir statt der Einheit 4. (Abb. 2) eine andere Einheit anwenden, die auch die Abweichung von Null nach Richtung und Größe berücksichtigen und dementsprechend den Bremsservomechanismus regulieren kann (praktisch mit dem Differentialverstärker zusammengebaut).

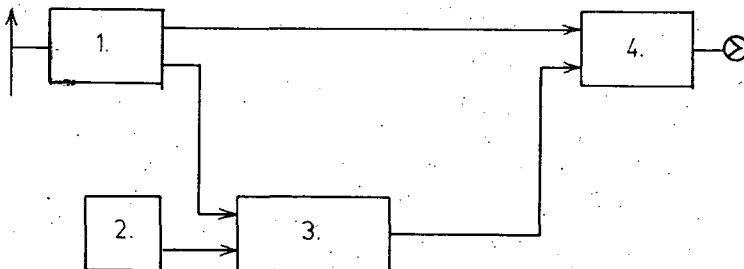


Abb. 3

- 1. Empfänger,
- 2. Meßgerät für Verzögerung,
- 3. Einheit zur Berücksichtigung und Regelung,
- 4. Bremsservomechanismus.

Zum Schluß soll noch bemerkt werden, daß das Kraftfahrzeug ② auch einmal die Rolle des Kraftfahrzeuges ① übernehmen kann. Darum müssen wir dieses neue Schema durch einen Sender und eine Senderantenne ergänzen:

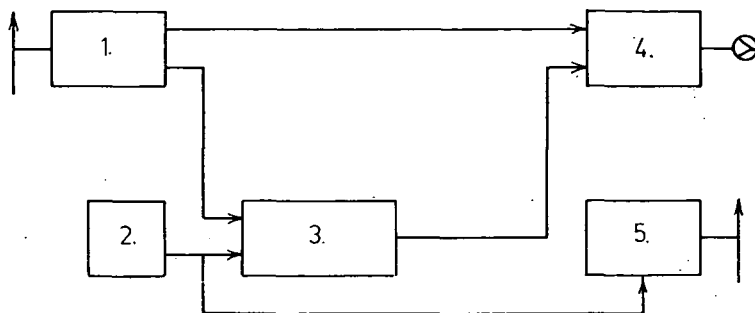


Abb. 4

- | | |
|------------------------------|---|
| 1. Empfänger, | 3. Einheit zur Berücksichtigung und Regelung, |
| 2. Meßgerät für Verzögerung, | 4. Bremsservomechanismus, |
| | 5. Sender. |

Wir haben unser System versuchsweise für zwei PKW nach diesem letzten Schema realisiert. Die Erfahrungen der Versuche sind überraschend gut geworden. Der Wert

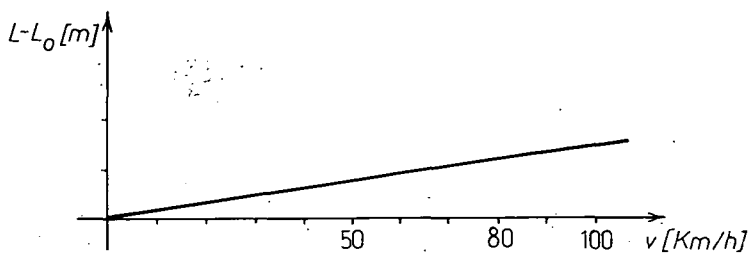


Abb. 5

$L - L_0$ ist ungleich Null da der Bremsservomechanismus eine bestimmte Betriebszeit hat.

(Eingegangen am 23. Sept. 1971)