

MATHEMATISCHE UND PHYSIKALISCH-TECHNISCHE PROBLEME DER KYBERNETIK

*Vorträge,
gehalten auf der Konferenz der Forschungsgemeinschaft
der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin
vom 20. bis 23. März 1962 in Berlin-Adlershof*

Mit 230 Abbildungen und 17 Tabellen



AKADEMIE-VERLAG · BERLIN

1963

DIE SICHERHEIT DES KRAFTFAHRZEUGVERKEHRS UND DIE AUTOMATIK

Die Sicherheit des Straßenverkehrs, in erster Linie die des Kraftfahrzeugverkehrs, ist eine vielumstrittene Frage unserer Tage. Die Tatsache, daß das Thema auf der Tagung behandelt wird, liegt in der ständig steigenden Tendenz der Unfallstatistik begründet. Diese Tendenz ist zugleich eine ernste Warnung, verbunden mit der Notwendigkeit, hier eine baldige, wirksame Abhilfe zu schaffen. Der Kraftfahrzeugverkehr ist heute eine der „Krankheiten“ mit der größten Mortalität. Wenn wir jede einzelne, vom Standpunkt der Außenwelt wesentliche Wirkungsphase oder Tätigkeit des am Verkehr teilnehmenden Kraftfahrzeugs und des Menschen, der es steuert, in bezug auf die Möglichkeiten des Eintretens eines Unfalls methodisch untersuchen, können wir folgende Feststellungen treffen: Etwas wesentlich und wirkungsvoll Neues hat in diesem Zusammenhang der Kraftfahrzeugbau in den vergangenen Jahrzehnten nicht aufzuweisen. Es bedarf nicht erst einer besonderen Beweisführung dafür, daß auch die technische Ausstattung des modernsten Kraftfahrzeugs größtenteils — wenn auch nicht ganz — lediglich der Verbesserung des Verhältnisses zwischen Fahrer und Fahrzeug, d. h. zwischen Subjekt und Objekt, dient und nicht der Verbesserung des dynamischen Abhängigkeitsverhältnisses des Verkehrsobjekts von den äußeren Faktoren.

Eine Senkung der Unfallziffer kann nur das Resultat strengerer verkehrspolizeilicher Regeln und deren Einhaltung sein, d. h. einer Erweiterung der Befehle des Steuerungsprogramms im Bewußtsein des Fahrers. Dies hätte aber sicher eine starke Abnahme der durchschnittlichen Verkehrsgeschwindigkeit zur Folge, wodurch der Gewinn an Reise- und Transportzeit bei den nicht an Schienen gebundenen Kraftfahrzeugen illusorisch würde; das würde sich wiederum hemmend auf den Blutkreislauf der Volkswirtschaft auswirken. Nun ist aber bei der Lösung der stets wachsenden Transportaufgaben die Sicherheit offensichtlich der wichtigste Gesichtspunkt und die Zeit der wesentlichste Parameter. Der moderne Kraftfahrzeugverkehr muß also zwei scheinbar widersprechenden Forderungen genügen.

Es taucht die Frage auf, ob bei den gegenwärtigen Straßennetz- und Straßenquantitätsverhältnissen, bei der Durchlaßfähigkeit der Straßen und dem allgemeinen technischen Niveau ein sicherer und schneller Kraftfahrzeugverkehr vorstellbar ist. Wir müssen hierauf unbedingt eine bejahende Antwort geben. Dabei muß allerdings bemerkt werden, daß im Interesse einer Verwirklichung dieses Ziels gewisse Änderungen der Verkehrslenkung und der gegenwärtigen Kraft-

fahrzeugbautechnik eingeführt werden müssen. Zwei Tatsachen weisen auf die Notwendigkeit dieser Änderungen hin:

Bei 85% der Unfälle ist der Mensch, der das Kraftfahrzeug lenkt, die direkte oder indirekte Ursache;

das Einholen und die Verarbeitung sämtlicher Informationen, die zum richtigen Fahren notwendig sind, und die reguläre physische Tätigkeit, die auf ihnen beruht, sind auch heute noch Aufgaben des Fahrers.

Bekanntlich sind Versuche unternommen worden, den Verkehr von Fahrzeugen ohne Fahrer abzuwickeln. Die Lösung ist ein Kabel, das unter der Fahrbahn verlegt ist und in dem Wechselstrom einer passend gewählten Frequenz strömt. In zwei Spulen, die an der Längsachse des Kraftfahrzeugs, das sich auf der Spurlinie über dem Kabel bewegt, rechts und links symmetrisch angebracht sind, induziert das elektromagnetische Feld des Kabels eine Spannung von entsprechender Größe. Weicht das Kraftfahrzeug von der Spurlinie ab, so löst sich das Spannungsgleichgewicht der beiden Spulen auf. Das ergibt ein Fehlersignal, das der Richtung und der Größe der Abweichung entspricht und das — entsprechend verstärkt — auf die Lenkvorrichtung wirkt. Dabei ist die Stabilität besonders wesentlich: Es darf keine Oszillation auftreten. Bei einer anderen, ähnlichen Lösung übernimmt eine Serie von Miniaturrundfunksendern, die entlang der Straße in regelmäßigen Abständen angebracht sind, die Rolle des Kabels. Im Falle eines Fehlers im Kraftfahrzeug ermöglichen beide Systeme das Verlassen der Spurlinie und das Anhalten auf manuellem Wege.

Es ist auch eine Kraftfahrzeugkolonne vorstellbar und durchführbar, die mit sogenannten Phototropautomaten versehen ist und in der das erste Kraftfahrzeug von einem Menschen gelenkt wird, während auf die folgenden Fahrzeuge Phototropautomaten aufmontiert sind. An der Rückseite eines jeden Kraftfahrzeugs ist zentral eine Lichtquelle angebracht — das erste, vom Menschen gelenkte Fahrzeug miteinbegriffen. Die Fahrzeuge ohne Fahrer werden dabei mit Hilfe der Phototropautomaten gesteuert. Dieses System eignet sich natürlich nur zur Abwicklung eines Verkehrs mit gleichbleibender Geschwindigkeit; das Starten der Kolonne ist sehr umständlich, das Anhalten geht durch das Ausschalten der Lichtquellen vor sich.

Wenn wir bedenken, daß diese Lösungen nur für den Verkehr auf Straßen verwendet werden können, die zu diesem Zweck gebaut oder hergerichtet worden sind und die von Fahrzeugen anderer Art nicht benutzt werden können, so stellt sich sofort heraus, daß das Gebiet ihrer realen Anwendung außerordentlich eng bemessen ist und daß sie betreffs der Grundfrage für uns kaum von Bedeutung sind. Wir müssen also von einer anderen Seite an das Problem herangehen, und in den folgenden Ausführungen möchte ich darauf näher eingehen.

Es ist zunächst notwendig, mit der konservativen Ansicht zu brechen, die in den subjektiven Steuerungsfehlern stets wirkende und nicht zu beseitigende Faktoren sieht. Da die Kraftfahrertätigkeit zum größten Teil eine Serie von zusammenfallenden oder zeitlich aufeinanderfolgenden unbedingten oder bedingten Reflexen ist und da die Größe der mit diesen Reflexen zusammenhängenden Reaktionszeit stark vom Allgemeinzustand des Nervensystems des Fahrers ab-

hängt, ist es offenkundig, daß die Lösung des Problems nur auf dem Wege der größtmöglichen Mechanisierung des Einholens und der Verarbeitung der Informationen und auf einem dadurch ermöglichten Ausschalten der Rolle des Menschen aus dem Prozeß der Kraftfahrzeugsteuerung — und dies bedeutet natürlich ein gewisses Ausschalten der subjektiven Fehler — zu erreichen ist. Dabei denken wir an die Entwicklung und Anwendung eines Automaten — dies wäre natürlich nur ein erster Schritt —, der durch seine entsprechenden Rezeptoren und durch das entsprechende System seiner Konstruktionselemente fähig wäre, gewisse äußere Reize aufzufangen, die für das Steuern des Kraftfahrzeugs von entscheidender Bedeutung sind, und auf Grund dieser Anregung, einem vorbestimmten Programm entsprechend, gewisse Steuerungsfunktionen zu vollbringen — ganz unabhängig vom Willen und von der gewollten Tätigkeit des Menschen, der das Kraftfahrzeug lenkt. Im weiteren wollen wir die Grundprinzipien einiger Automaten solchen Typs streifen.

Vom Menschen werden die zur Steuerung notwendigen Informationen vorwiegend durch visuelle Reize aufgenommen; die Rolle der akustischen Reize kommt erst an zweiter Stelle in Betracht, obwohl auch sie nicht vernachlässigt werden darf. Diese Kodierungsform ist für künstliche Rezeptoren natürlich ungeeignet, daher bedarf es einer gewissen Kodetransformation, durch die ein mechanisches Einholen eines Teils der zum Steuern nötigen Informationen ermöglicht wird. Diese Kodetransformation ist die wesentlichste Frage bei der Konstruktion des Verkehrsautomaten, dies um so mehr, als der Kompliziertheitsgrad der außerhalb des Kraftfahrzeugs angebrachten Informationsgeräte durch die Art der Transkodierung bestimmt wird, und dies bedingt auch die wirtschaftlichen Auswirkungen und ganz allgemein die Möglichkeit der umfassenden praktischen Anwendungen.

Die Kodetransformation der zur richtigen Kraftfahrzeugsteuerung notwendigen Informationen ist ohne Zweifel eine durchaus neue Aufgabe. Solange nur von einer automatischen Auswertung der Verkehrszeichen die Rede ist, stehen wir offenbar vor einem Problem der digitalen Automation, da die Verkehrszeichen ein diskretes System bilden. Daher liegt es — nach dem Vorbild anderer Probleme digitaler Automation — zunächst auf der Hand, die möglichen aufzunehmenden Informationen durch eine Impulsfolge zu kodieren. Bei der Projektierung eines Automaten vom IK-(Impuls-Kode-)Typus befolgen wir diesen Weg: Jede einzelnen aufzunehmenden Information ordnen wir umkehrbar eindeutig eine Impulsfolge zu. Die Bedeutung einer Impulsfolge ergibt die (optimal ausgewählte) Kombination von Vorhandensein oder Fehlen eines Impulses zu den durch die Wiederholungsfrequenz bestimmten Zeitpunkten.

Bei einem IK-System ist sodann an jedem Verkehrsschild ein kleiner Mikrowelleneffektor anzubringen, der laufend die der Bedeutung des Schildes entsprechende Impulsfolge sendet. Ein spezielles Empfangsgerät im Kraftfahrzeug „beobachtet“ die innerhalb einer bestimmten Entfernung gesendeten Impulsfolgen, wertet diese aus und betätigt die entsprechenden Stellglieder am Fahrzeug.

Das IK-System hat allerdings den bedenklichen Nachteil, daß im Empfangsgerät unbedingt gewisse Speicherzellen vorhanden sein müssen. Darüber hinaus

muß sowohl im Effektor als auch im Empfangsgerät für eine hochgradige Stabilität der Wiederholungsfrequenz gesorgt werden. Diese Erfordernisse würden die Einführung der Automaten vom IK-System ohne Zweifel ziemlich kostspielig machen.

In Anbetracht der Tatsache, daß die Anzahl der Verkehrszeichen nicht besonders groß ist, eröffnet sich die Möglichkeit zur Schaffung einer Kodetransformation anderen Typus, nämlich eines Frequenzkode im Bereich der ultrakurzwelligten elektromagnetischen Schwingungen. In einem FK(Frequenz-Kode)-System werden der maschinelle Empfang und die maschinelle Verarbeitung der kodierten Informationen sämtlicher Verkehrsschilder (Verbots-, Warn-, Gebotsinformationen usw.) und der einzelnen Befehle des Lenkungsprogramms im Bewußtsein des Fahrers (Geschwindigkeitsbeschränkung in bewohnten Gebieten, Berücksichtigung der Signale der Verkehrsampel, Bremsen beim Aufleuchten der Bremslichter des vorausfahrenden Fahrzeugs, pflichtgemäßes Anhalten beim Signal eines Verkehrspolizisten usw.) auf folgende Weise gelöst: Jeder auf maschinellem Wege zu empfangenden Information ordnen wir umkehrbar eindeutig eine passend gewählte Frequenz zu. Am Sendeort bringen wir einen Miniatürooszillator sehr kleiner Kapazität an, der auf der Frequenz arbeitet, welche der zu sendenden Information entspricht. Die Übertragungsweite des Oszillators wird im wesentlichen durch den Bremsweg bestimmt, der bei der am betreffenden Ort zu erwartenden größten Verkehrsgeschwindigkeit auftritt. Im Kraftfahrzeug ist ein spezielles Empfangsgerät angebracht, das von den Wirkungen, die seinen Rezeptor treffen, in Zeitspannen, die von der Verkehrsgeschwindigkeit abhängen, „eine Probe nimmt“, d. h., das seine auf die Kodefrequenzen abgestimmten Schwingkreise nacheinander auf Resonanz untersucht. Der Ausgangsschalter, der mit dem Reihenschalter der Schwingkreise synchron arbeitet, betätigt das entsprechende elektromechanische Stellglied, wenn auf irgendeinem der Schwingkreise eine Resonanzspannung auftritt. Der strenge Synchronismus des Reihenschalters und des Ausgangsschalters sichert die gegenseitige Eindeutigkeit der Kodefrequenzen und des maschinellen Eingriffs in die Steuerung, d. h., es wird auf diese Weise sichergestellt, daß eine den einzelnen Kodefrequenzen entsprechende mechanische Reaktion zustande kommt.

Bevor wir die Grenzen der Anwendbarkeit des FK-Systems untersuchen, wollen wir die Arbeitsweise des Systems an einem Beispiel erläutern. Es seien I_1, I_2, \dots, I_n die frequenzkodierten Informationen, und es sei R_1, R_2, \dots, R_n die Folge der entsprechenden mechanischen Reaktionen. Wie schon bemerkt, ist die Zuordnung zwischen den beiden Folgen umkehrbar eindeutig. Zum Beispiel sei I_k die Frequenz des Stop-Schildes. Wenn im k -ten Schwingkreis im Laufe des zyklischen „Abtastens“ eine Spannung auftritt, d. h., wenn sich das Kraftfahrzeug dem Oszillator bis auf Bremsentfernung genähert hat, so löst dieses Zeichen die Reaktion R_k aus, die darin besteht, daß dem Motor das Gas entzogen, die Kupplung gelöst und die Bremse betätigt wird — dies alles auf mechanischem Wege. Dabei bringt I_k eine bleibende Veränderung in der Funktion der Stellglieder zustande: Die Reaktion hält so lange an, bis die gewünschte Wirkung eintritt, d. h. bis das Kraftfahrzeug stoppt. Die Abnahme der Geschwindigkeit bis zum Wert 0 hebt

die Wirkung von I_k auf. Die Wirkung eines inneren Rezeptors, der die Geschwindigkeit mißt, bestimmt die Betätigungsgeschwindigkeit der Stellglieder.

Das FK-System eignet sich nicht zur automatischen Änderung der Fahrtrichtung der Kraftfahrzeuge, daher wirkt der Stellmechanismus nur auf die Drosselklappe des Vergasers, auf die Kupplung und auf die Bremse. Die Betätigungsarten, die auf Grund der verschiedenen Codefrequenzen zustande kommen, weichen voneinander nur in ihrer Intensität ab. Dennoch schätzen wir, daß die Verkehrssicherheit der mit einem Verkehrsautomaten vom FK-Typus versehenen Kraftfahrzeuge — in erster Linie denken wir dabei an Kraftwagen — um 55 bis 60% steigt, ist doch die nicht entsprechende oder verspätete Betätigung der vorhin erwähnten Steuerungsteile — vor allem die der Bremse — die Ursache der meisten Unfälle. Wir wollen hier nicht die dekodierte Gestalt einer möglichen I_1, I_2, \dots, I_n -Folge aufzählen, der Anwendungsbereich des FK-Systems wurde oben bereits umrissen. Allerdings weisen die Untersuchungen, die wir im Szegeder Laboratorium der Klasse für Mathematische Logik und ihre Anwendung des Mathematischen Forschungsinstituts der Akademie angestellt haben, darauf hin, daß das Anwendungsgebiet des FK-Systems nach der Lösung einiger praktischer Fragen, die beim Aufbau des Systems offen geblieben sind, erweitert werden kann.

Sowohl das FK- als auch das IK-System lassen eine Reihe von Verkehrsproblemen unberührt. Eines der wesentlichsten Probleme unter diesen ist ein sehr kritisches Moment des Kraftfahrzeugverkehrs, nämlich das Überholen. Seine richtige Durchführung erfordert ohne Zweifel eine hohe geistige Tätigkeit des Fahrers, besonders dann, wenn Gegenverkehr zu erwarten ist. Es genügt, wenn wir erwähnen, daß ein Gerät zur Automation des Überholvorgangs folgender Informationen bedarf: die Geschwindigkeit des zu überholenden Kraftfahrzeugs, die Entfernung und Geschwindigkeit entgegenkommender Fahrzeuge im gegebenen Augenblick, die Geschwindigkeit und das Beschleunigungsvermögen des eigenen Fahrzeugs, das Ausmaß einer eventuellen Geschwindigkeitsbeschränkung. Diese Informationen sind die ständig wechselnden Parameter oder Konstanten eines Betätigungsprogramms. Auf ihrer Basis muß auf automatischem Wege das Urteil über die Überholungsmöglichkeit gefällt werden, und daraufhin müssen im Falle einer positiven Entscheidung die Lenkungenfunktionen und die Funktionen zur Steigerung der Geschwindigkeit vorgenommen werden. Wir haben den Versuch unternommen, die theoretische Struktur einer Gerätegruppe, die wir als EGM-System (Entfernung-Geschwindigkeits-Meßsystem) bezeichnen, zu konstruieren.

Als Kombination eines FK- und eines EMG-Systems können wir — augenblicklich natürlich nur theoretisch — einen Automaten eines Typus skizzieren, der auf Grund eines von vornherein bestimmten Programms fähig ist, Steuerungsfunktionen auszuüben, die zum Zurücklegen ganzer Strecken nötig sind. Auf Grund seiner Konstruktion ist er in der Lage, notwendige Abweichungen von der Fahrbahn zu korrigieren (es handelt sich z. B. um Abweichungen, die durch ein Überholen verursacht werden) und mittels seiner inneren Rezeptoren im Falle eines Fehlers am Kraftfahrzeug die allernotwendigsten Aufgaben auszuführen. Im Zusammenhang mit dem Aufbau eines solchen Automaten systems sind natürlich

die Ökonomie und die Verlässlichkeit die wichtigsten Fragen. Unserer Meinung nach können durch eine rationale Miniaturisierung und Parallelisierung der Konstruktionselemente diese Fragen gelöst werden.

Wie ersichtlich, bezieht sich ein Teil unserer Versuche darauf, daß die Sicherheit des Kraftfahrzeugverkehrs auf ein Maximum erhöht wird. Richtlinie hierfür ist die Erkenntnis, daß auf diesem Gebiet nur die Automatik und die Kybernetik durch die erwähnten und ähnliche Schöpfungen etwas entscheidend Neues hervorzubringen vermögen. Wir glauben und hoffen, daß die Ergebnisse, die heute nur im Laboratorium zu verzeichnen sind, alsbald in der Praxis eine tiefgreifende Rolle spielen werden.

Anhang

Operatorschema des Überholens:

$$p \overset{1}{\uparrow} I_l L_l q \overset{2}{\uparrow} \left\{ G^+ \right\}_{t=t_0}^s G^+ I_r L_r G^- I_0 \overset{2}{\downarrow} I_r G^- B L_r I_0 \overset{1}{\downarrow} \dots$$

mit folgenden Bedeutungen:

p ist eine logische Bedingung, die ausdrückt, daß vor meinem Wagen W_0 ein anderer Wagen W_1 fährt, den ich überholen kann, also:

$$p = \exists W_1 (x(W_1) > x(W_0)) \wedge v(W_1) > 0 \wedge \\ \wedge v_{\max}(W_0) > v(W_1) \wedge x(W_1) > x(W_0) + 3b(v(W_0)).$$

$x(W)$ = Abskizze des Wagens W

$v(W)$ = Geschwindigkeit des Wagens W

$b(v)$ = Bremsweg bei der Geschwindigkeit v

I_l = Operator Winker nach links

L_l = Operator Lenkung nach links

(eigentlich selbst ein komplizierter Operator mit Schleife: es soll zunächst so lange nach links gelenkt werden, bis man die Straße beiderseits übersehen kann — der Lenkungswinkel hängt dabei von meiner Geschwindigkeit und dem Abstand von W_1 ab —, und dann soll wieder in gerader Richtung gelenkt werden)

q ist eine logische Bedingung, die ausdrückt, daß der Überholvorgang durch kein Hindernis behindert wird, also:

$$q = \exists W_1 [x(W_1) \geq x(W_0) \wedge v(W_1) > 0 \wedge v_{\max}(W_0) > v(W_1) \wedge \\ \wedge \forall W_2 (x(W_2) > x(W_1) \wedge v(W_2) > \rightarrow x(W_2) > x(W_1) + 3b(v_{\max}(W_0)) \wedge \\ \wedge (v(W_2) < 15 \text{ km/h} \rightarrow x(W_2) > x(W_1) + 6b(v_{\max}(W_0))) \wedge \\ \wedge \forall W' (x(W') > x(W_0) \wedge v(W') < 0$$

(also W' in entgegengesetzter Richtung fährt)

$$\rightarrow x(W_1) + v(W_1) \frac{x(W_1) - x(W_0)}{v_{\max}(W_0) - v(W_1)} < \\ < x(W') - v(W') \frac{x(W_1) - x(W_0)}{v_{\max}(W_0) - v(W_1)} + 3b(v_{\max}(W_0)) \wedge \dots$$

wobei ... ausdrückt, daß keine weiteren Überholhindernisse bestehen (Überholverbot usw.)

G^+ = Operator Beschleunigung durch Gaspedal

I_r = Operator Winker nach rechts

L_r = Operator Lenkung nach rechts

G^- = Operator Gaswegnehmen

I_0 = Operator Winker in Grundstellung

B = Operator Bremsen

$\downarrow \dots$ = Rückkehr zum Hauptprogramm
(gewöhnliches Fahrprogramm)