

Vom ‚Futurama‘ zum kognitiven Automobil – zur Geschichte des autonomen Fahrens aus der Perspektive der historischen Kraftfahrzeugforschung

Gian Marco Secci

Inhaltsübersicht

1.	Einleitung	97
2.	1930er bis 1950er Jahre: Technische Utopien	101
3.	1960er bis 1970er Jahre: Einführung der Fahrzeugelektronik auf breiter Ebene	107
4.	1980er bis 1990er Jahre: der Weg zum kognitiven Automobil	111
	(a) Forschungen in den USA	112
	(b) Forschungen in Deutschland	114
	(c) PROMETHEUS	118
5.	Fazit	119
6.	Literaturverzeichnis	121

1. Einleitung

Die ersten Überlegungen und Versuche ein Kraftfahrzeug eigenständig fahren zu lassen glichen eher Utopien und Science-Fiction-Szenarien. Als Vorreiter auf diesem Gebiet kann der US-Automobilkonzern General Motors (GM) gelten, der sich bereits Jahrzehnte vor anderen Herstellern weltweit mit dem Thema selbstständig navigierender und kommunizierender Fahrzeuge befasste. Bestrebungen autonome Fahrzeuge zu entwickeln, wurden durch die Sicherheits- und Umweltdebatten der späten 1960er bis in die frühen 1980er Jahre zunächst weitestgehend ausgebremsst. Die Automobilhersteller weltweit sahen sich mit den Folgen des bis dahin nur wenig regulierten Fahrzeugbaus konfrontiert, so dass für anwendungsferne Grundlagenexperimente keine Ressourcen vorhanden waren. Allerdings schuf die sukzessive Einführung elektronischer Bauteile und die Halbleitertechnik in den Automobilbau, beispielsweise bei der Motorensteuerung, während dieser Phase die Basis für eine erfolgversprechende Grundlagenforschung an autonomen Fahrzeugen ab den 1980er Jahren.

Der Beitrag umreißt anhand einiger der maßgeblichen technischen und gesellschaftlichen Entwicklungen die frühen Phasen der Fahrzeugkommunikationstechnik und des assistierten bzw. autonomen Fahrens. Die Frage der Verbesserung der automobilen Verkehrsflüsse regte schon in den 1920er Jahren eine ganze Reihe bekannter Architekten wie Le Corbusier (1887–1965) zu Überlegungen an. In aller Regel ordneten sie in ihren Arbeiten¹ die Stadt- und Verkehrsplanung ganz den Belangen des individuellen Automobil-Verkehrs unter. Als Folge des zunehmenden Automobil-Verkehrs im 20. Jahrhundert entstanden beispielsweise die riesigen Highway-Systeme der USA. In Europa wurden die Zerstörungen des Zweiten Weltkriegs vielfach als Möglichkeit wahrgenommen, dem Automobil in den Städten mehr Raum zu geben.²

Eine Anpassung der Automobile selbst an die sich verändernden Rahmenbedingungen spielte demgegenüber lange Zeit keine wesentliche Rolle bei der kraftfahrzeugtechnischen Entwicklung. Die Vorstellung, dass ein Automobil nicht nur passiv Passagiere oder Fracht von einem Ort zu einem anderen befördert, sondern die Fahrt aktiv durchführt, kommuniziert und auf Geschehnisse in seiner Umgebung reagiert, ist keineswegs erst im „digitalen Zeitalter“ entstanden. Die ersten Versuche Automobile automatisiert fahren zu lassen – dies sei schon vorab gesagt – dienten vorwiegend dazu, trotz steigender Unfallzahlen, aufkommendem Umweltschutz und des sich verdichtenden Verkehrs, dem Privat-PKW ein positives Image zu verleihen. Erst die seit den 1980er Jahren durchgeführten Versuche und erreichten Innovationen lassen das autonome Fahren als einen Weg erscheinen, Verkehrsflüsse zu synchronisieren und zu rhythmisieren.

An der möglichen Schwelle³ zur Verbreitung des autonomen Fahrens rückte dessen Geschichte in jüngster Zeit auch in den Fokus der histori-

1 Exemplarisch sind Le Corbusiers Projekte „Stadt der Gegenwart mit drei Millionen Einwohnern“ (1922) oder die Verbindung des Stadtzentrums von Algier mit zwei Vororten mittels einer 60 bis 90 Metern über dem Bodenniveau verlaufenden Autostraße und direkt darunter liegenden Wohnungen zu nennen. Vgl.: Kreuzer: Die Stadt und das Auto, S. 13.

2 Ebd., S. 15.

3 Mit der Verabschiedung der „Änderung des Straßenverkehrsgesetzes und des Pflichtversicherungsgesetzes – Gesetz zum autonomen Fahren“ im Frühjahr 2021 verfügte die Bundesrepublik Deutschland als weltweit erste Nation über eine rechtliche Rahmenbedingung zum autonomen Fahren. Vgl.: o.V.: „Fahrerloser Regelbetrieb. Deutschland übernimmt Pionierrolle für autonomes fahren“, in: *Manager Magazin*, 21.05.2021.

schen Forschung⁴. Der vorliegende Beitrag beruht auf unterschiedlichem Quellenmaterial: Zum einen wurden Informationen aus aktuellen historiographischen Publikationen und online einsehbaren Artikeln zur Geschichte der Kraftfahrtforschung und des autonomen Fahrens in der Automobilindustrie, staatlichen Institutionen und Universitäten gewonnen. Zum anderen wurde neuere sowie zeitgenössische technische Fachliteratur wie Artikel internationaler Fachverbände miteinbezogen.

Im Rahmen dieses Beitrags sollen die wesentlichen forschungshistorischen Entwicklungsphasen nachgezeichnet werden, welche die Grundlagen für die Genese heutiger fahrzeuggebundener Assistenzsysteme⁵ und Kommunikationstechnologien bilden. Es wird nach den beteiligten Institutionen und deren Handlungsmotivation gefragt. Darüber hinaus wird die Frage gestellt, welche Forschungs- und Entwicklungsmethoden zur Anwendung kamen. Die geographische Verortung bilden die USA und die Bundesrepublik Deutschland, da hier die maßgeblichen Innovationen stattfanden.

Es werden drei zeitliche Phasen⁶ der bisherigen Entwicklung der Fahrzeugkommunikationstechnik (FKT)⁷ beleuchtet: Die erste Phase erstreckt sich von den späten 1930er Jahren bis zum Ende der 1950er Jahre. In

-
- 4 Aktuelle und instruktive Überblicke zum Themengebiet der Geschichte von Assistenzsystemen und des autonomen Fahrens finden sich beispielsweise bei Wetmore: *Reflecting on the Dream of Automated Vehicles*, S. 69–94 und in: Schneider: *Bewege mich!*, S. 28–35.
 - 5 Der Begriff der „Assistenzsysteme“ kann sehr weit gefasst werden: Schneider bietet hier an, auch technische Installationen darunter zu fassen, welche zum einen die Durchführung der Fahrt für den Fahrer erleichtern (elektrischer Anlasser, Windschutzscheibe) und zum anderen den Verkehrsfluss verbessern sollen (Handzeichen, Winker, Blinker). Vgl.: Schneider: *Bewege mich!* S. 28 f.
 - 6 Dieser Beitrag orientiert sich dabei wesentlich am Phasenmodell von Jameson Wetmore. Vgl.: Wetmore: *Reflecting on the Dream of Automated Vehicles*, S. 69 f.
 - 7 Die Fahrzeugkommunikationstechnik (FKT) zählt seit dem Ende der 1990er Jahre zu einer der bedeutenden technologischen Innovationen im Automobilbau. Sie definiert sich über drei wesentliche Teilbereiche: 1. Die Kommunikationstechnik für den Datenaustausch und die Datenspeicherung zwischen Teilsystemen und Aggregaten innerhalb eines Fahrzeuges durch sog. Bussysteme und mittels Sensoren und Aktuatoren. 2. Kommunikationstechnik für Fahrassistenzsysteme und Multimedia-Anwendungen. 3. Kommunikationstechnik für die Konfiguration und Entwicklung von Fahrzeugsystemen und deren Diagnosen. Darüber hinaus erfasst die FKT auch den Informations- und Datenaustausch über das Fahrzeug hinaus. Dies beinhaltet auch eine vernetzte Kommunikation beispielsweise von Fahrzeugen untereinander zur Verbesserung des Verkehrsflusses.

diesem Zeitraum war es vor allen Dingen der US-Konzern General Motors (GM), der zunächst im Rahmen einer Weltausstellung erste Visionen zur FKT präsentierte. In den 1950er Jahren führte GM, begleitet von sehr umfassenden medialen Inszenierungen, erstmals auch praktische Fahrversuche durch. Die zweite Phase, von den 1960er über die 1970er Jahre, ist gekennzeichnet durch einen sukzessiven Einzug von Halbleiter- und Elektrotechnik in die Automobile. Hier vor allem in Form von Kraftstoffeinspritzanlagen und in der Abgasreinigungstechnik. Die dritte abschließende Phase hat ihren Schwerpunkt in der beginnenden Grundlagenforschung der 1980er und frühen 1990er Jahre. In den USA und der Bundesrepublik Deutschland wurde mit unterschiedlichen Voraussetzungen und Methoden ab den späten 1970er Jahren an autonomen Fahrzeugen geforscht. Dabei gelang es 1987 erstmals unter Einsatz von Videotechnik und digitaler Mikroprozessoren, Automobilen einen kognitiven Gesichtssinn zu verleihen. Mit diesem „4-D-Ansatz“ wurde eine wichtige Voraussetzung für sich daran anschließende Forschungsprojekte zum autonomen Fahren geschaffen.⁸

Die Automobilindustrie und ihre Interessenorganisationen, in diesem Fall die amerikanische Society of Automotive Engineers (SAE), haben als aktuellen und zukünftigen Handlungsrahmen ein 5-Stufenmodell für die Definition des autonomen Fahrens entwickelt. Dieser umfasst Systeme, die bei aktuellen Fahrzeugen bereits in den Serienbau eingegangen sind sowie zukünftige Systeme, die aus technischer Sicht ein vollkommen führerloses Fahren ermöglichen sollen. Das Stufenmodell orientiert sich daran, inwieweit menschliche Fahrer noch wachsam und eingriffsbereit sein müssen.⁹

ses. Vgl.: Rauner / Hitz / Spöttl: Expertise 3. Wissenschaftliche Begleitung zur Neuordnung der fahrzeugtechnischen Berufe, S. 2 ff.

8 Dickmanns: Fahrzeuge lernen Sehen, S. 61.

9 1. Assistiertes Fahren: Fahrer werden durch mindestens ein modernes Assistenzsystem (z.B. Tempomaten mit Abstandsregelung oder Spurhalteassistenten) unterstützt. 2. Teilautomatisiertes Fahren: Auf diesem Level kommunizieren zwei oder mehr Assistenzsysteme miteinander (z.B. Stauassistenten die gleichzeitig bremsen oder beschleunigen und lenken). 3. Bedingt automatisiertes Fahren: Der Schritt in das Level 3 stellt einen vergleichsweise großen Sprung in der Autonomie des Fahrzeugs und die aktuelle Grenze der technischen Entwicklung und der gesetzlichen Rahmenbedingungen dar. Fahrzeuge mit diesen Systemen können temporär selbstständig fahren. 4. Hochautomatisiertes Fahren: Fahrzeuge mit Level 4-Systemen können ganze Fahrten ohne menschlichen Eingriff übernehmen. Einschränkungen ergeben sich aus geographischen und klimatischen Einflüssen oder der Einsatz bleibt auf bestimmte Geschwindigkeitsbereiche beschränkt. 5. Autonomes oder komplett automatisiertes Fahren: auf dieser

Erste Unternehmen wie die Google-Tochter Waymo, General Motors und eine Reihe kleinerer „Start-ups“ haben bereits erste Prototypen von Level 5-Fahrzeugen entwickelt. Fahrversuche erfolgen dazu in klimatisch günstig gelegenen Städten der USA in vorab eingegrenzten Arealen.¹⁰

2. 1930er bis 1950er Jahre: Technische Utopien

Erste Ideen und Konzepte zur Unterstützung des Fahrers wurden in den USA vorgestellt und konkret erprobt. Hier war weltweit als erstes eine masenhafte Motorisierung mit Kraftfahrzeugen bereits in der Zwischenkriegszeit erreicht worden. Neben technischen Innovationen an den Fahrzeugen selbst, sahen die Vorstellungen auch umfangreiche bauliche Veränderungen am bereits bestehenden Straßensystem vor. Als Ausgangspunkt für das Konzept dessen, was heute allgemein als „autonomes Fahren“ bekannt ist, spielte die Weltausstellung von 1939/40 in New York eine besondere Rolle. Unter dem Motto „The World of Tomorrow – all Eyes to the Future“ zeigten die verschiedenen Pavillons Visionen für das Jahr 1960 auf.¹¹ Allerdings warf der aufziehende Zweite Weltkrieg bei der Eröffnung bereits seine Schatten voraus: so nahmen China und Deutschland nicht an der Ausstellung teil.¹²

Die Themen Kommunikation und Vernetzung wurden hier erstmals gemeinsam auch von der Automobilindustrie aufgegriffen. Der vom renommierten Industrie-Designer Norman Bel Geddes (1893–1958) für General Motors unter dem Motto „Highways and Horizons“ entworfene

Stufe kann von einem komplett automatisierten „Roboterauto“ gesprochen werden. Die Fahrzeuge sind in der Lage eine Fahrt mit sämtlichen auftretenden Situationen, auch unter beispielsweise widrigen Wetterverhältnissen durchzuführen. Vgl.: Eckl-Dorna: Die 5 Level des autonomen Fahrens, online abgerufen unter: <https://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/selbstfahrend-e-autos-die-5-stufen-des-autonomen-fahrens-erklart-a-1256773.html> (abgerufen am 22.02.2022)

10 Ebd.

11 Zu den hier erstmals gezeigten Erfindungen und Kuriosa zählte der elektrische Geschirrspüler von Westinghouse, der „Voder“ von AT&T, eine Maschine zur Sprachverschlüsselung oder der „Rotolactor“. Hierbei handelte es sich um eine vollautomatisierte elektrische Melk- und Waschanlage für Kühe, die sogar über eine eigene Softeis-Produktion verfügte. Vgl.: Borchers: Vor 70 Jahren, online abgerufen unter: <https://www.heise.de/ct/artikel/Vor-70-Jahren-Die-Welt-von-morgen-war-auch-einmal-besser-301540.html> (abgerufen am 22.02.2022), S. 5.

12 Vgl. ebd., S. 6

Pavillon „Futurama“ zählte zu den meist frequentierten der gesamten Ausstellung.¹³ Die Besucher wurden auf fahrbaren Stühlen durch die Anlage befördert, Lautsprecher erläuterten die Darstellungen moderner, stromlinienförmiger Städte, industrialisierter und automatisierter Farmen oder Flughäfen für Luftschiffe.¹⁴ Das Zentrum des Pavillons stellte eine lebensgroße Straßenkreuzung mit echten, dicht aneinander gereihten Automobilen und einer eigenen Ebene für Fußgänger und Schaufenster einer Stadt im Jahr 1960 dar, welche die Besucher zu Fuß erkunden konnten. Daneben zeigten eine ganze Reihe kleinerer Dioramen und Präsentationen mögliche verkehrstechnische Zukunftsszenarien auf: kreuzungsfreie Highways mit beleuchteten Spuren für unterschiedliche Geschwindigkeiten, maschinell überwachte Zu- und Abfahrten und eine frühe Form einer intelligenten Verkehrsflusssteuerung. Eines der Dioramen stellte einen Abschnitt eines mehrspurigen „express motorways“ dar, auf dem sich kleine Modelle von PKW, LKW und Bussen automatisiert entlang ihrer Fahrspuren bewegten. Der Abstand zwischen den Fahrzeugen sollte durch eine automatische Funk-Fernsteuerung geregelt werden. Kanal-förmige Fahrrinnen hätten die Automobile darin lediglich mit Hilfe der Schwerkraft in der Spur gehalten. Dadurch sollte die Fahrsicherheit trotz einer höheren Geschwindigkeit gesteigert werden.¹⁵

Die von Geddes vorgeschlagenen Lösungen hätten allerdings weiterhin einen menschlichen Fahrer, vor allem aber ein gänzlich neu ausgebautes Straßensystem, benötigt. In seinen Entwürfen blieb Norman Geddes bei der Frage der Realisierbarkeit vage. Vor dem Hintergrund der gerade überstandenen wirtschaftlichen Depression in den USA sollte Futurama, wie auch andere Pavillons der Weltausstellung, vielmehr zeigen, dass neue Technologien und die Firmen, die sie produzierten, einen Ausweg in eine positive Zukunft bieten konnten.¹⁶

Der Ausbruch des Zweiten Weltkriegs bremste zunächst jegliche Entwicklung auf dem Gebiet des automatisierten Fahrens aus. Eine ganze Reihe der Vorschläge, die Geddes in seiner Arbeit für General Motors ins-

13 Der Andrang auf den Pavillon von General Motors war derartig groß, dass das Unternehmen 1940 sogar einem Film unter dem Titel „To New Horizons“ erstellen ließ. Der Film ist abrufbar unter:

<https://archive.org/details/ToNewHor1940> (abgerufen am 22.02.2022).

14 Wetmore: *Reflecting on the Dream of Automated Vehicles*, S. 75.

15 „Safe distance between cars is maintained by automatic radio control [while] curved sides assist the driver in keeping his car within the proper lane under all circumstances.“ Ebd., S. 76.

16 Ebd., S. 75.

besondere im Bereich der Verkehrsführung und des Straßenbaus machte, wurden später dennoch realisiert. 1956 unterzeichnete Präsident Dwight D. Eisenhower (1890–1969) den „National Interstate and Defense Highway Act“, der eine Phase des intensiven Straßenbaus in den USA einleitete. Die Interstates, den deutschen Bundesstraßen ähnliche Fahrwege, dienten der Unterstützung der Highways. Im Zuge des Ausbaus dieses Straßensystems wurden einige Elemente, wie die kreuzungsfreien Übergänge oder die Entschärfung gefährlicher Abschnitte, die Norman Geddes Ende der 1930er Jahre präsentiert hatte, aufgegriffen. Die Automobile selbst wurden nicht weiter automatisiert.¹⁷

Während des Zweiten Weltkriegs und durch das Wettrüsten des in der unmittelbaren Zeit danach einsetzenden „Kalten Kriegs“, kam es durch die Anforderungen des US-amerikanischen Militärs zu umfangreichen Fortschritten in der Elektrotechnik.¹⁸ Die großen US-Automobilkonzerne Ford, GM und Chrysler zeigten rasch großes Interesse daran, die neuen Technologien auch in ihren Fahrzeugen anzuwenden. Insbesondere GM verfolgte die Idee des automatisierten Fahrens und begann nach Kriegsende mit einer umfassenden Grundlagenforschung.¹⁹

Mitte der 1950er Jahre, entwickelte GM in Kooperation mit dem großen Elektronikunternehmen „Radio Corporation of America“ (RCA) einen fahrfähigen Prototyp. Auf Basis eines Chevrolet Impala und auf einer eigens errichteten Teststrecke von über zwei Meilen Länge wurden ab 1958 erste Versuche am werkseigenen Technical Center in Warren, Michigan durchgeführt. Für das „Experimental Automatic Control System“ des sogenannten „Electronic Chauffeur“ war ein Kabel in die Teststrecke eingelassen und eine Wechselspannung daran angelegt. Die elektromagnetischen Steuerungsimpulse zum Fahrzeug wurden mittels eines Empfängers an ein

17 Ebd., S. 77.

18 Hier hatten beispielsweise raumsparende Radarsysteme in Kampfflugzeugen oder kleine Annäherungszünder für Granaten entscheidende Impulse für die Miniaturisierung elektronischer Bauteile, wie Transistoren, für die Verringerung des Stromverbrauchs gegeben. Vgl.: Braun / Kaiser: Energiewirtschaft, Automatisierung, Information seit 1914, S. 342.

19 Der Begriff beschreibt hier eine zielgerichtete und systematische, aber nicht notwendigerweise anwendungsbezogene Forschungsbemühung. Schon während der Versuche im Jahr 1958 war klar, dass ein solches System auch mittelfristig noch nicht alltagstauglich sein würde: „Although the large amount of sensing and decision required even for light city traffic makes control under these circumstances appear impractical for the present, complete automatic control on a limited access road does seem feasible.“ Bidwell / Cataldo: Electronic Chauffeur may guide car of Future, S. 64.

eigens dafür entwickeltes Steuerungssystem („GM Unicontrol“) weitergegeben. Erstmals war es damit möglich, bei einem kompletten Automobil automatisch den Fahrbetrieb zu regeln.²⁰ Die Steuereingaben erfolgten nicht wie zuvor herkömmlich über ein Lenkrad und Pedale. Diese wurden nun zentral über einen kleinen beweglichen Steuerknüppel eingegeben: nach vorne geschoben, beschleunigte dieser das Fahrzeug, ein Ziehen nach hinten bremste den Wagen ab. Bewegungen nach links oder rechts änderten jeweils die Fahrtrichtung.²¹

Das Ziel der Entwicklung war es, die Belastung für den Fahrer zu reduzieren, da sich gezeigt hatte, dass Unfälle zu rund 95% auf Fahrfehler zurückzuführen waren. Durch die Einbettung in ein geschlossenes System, in welchem die Fahrzeuge menschliche Aufgaben übernahmen, sollten Fahrten mit dem Automobil sicherer, bequemer und schneller werden. Der elektronische Chauffeur sollte die Nachteile, die menschliche Reaktionszeiten mit sich bringen, verringern. Das Unicontrol-System wurde darauf ausgelegt, die menschliche Sensorik, also die Lage des Fahrzeugs auf der Fahrbahn und in Bezug zu anderen Fahrzeugen sowie die Steuerungseingaben (Richtungsänderung und -haltung, Beschleunigen, Bremsen) während der Fahrt zu übernehmen.

Ein Kernproblem stellte aber die Kommunikation der einzelnen Fahrzeuge untereinander auf der Strecke während der Kolonnenfahrt dar. Der Signaltransfer fand über die Führungsleitung in der Straße statt. Während der Versuche hatte sich herausgestellt, dass schon unter den gegebenen idealisierenden Laborbedingungen bei mehreren Fahrzeugen die Einhaltung eines sicheren Abstands schwierig war. Statische Objekte auf der Straße, wie ein liegengebliebenes Fahrzeug, wurden gar nicht erkannt. Zudem war es nicht möglich, auf eventuelle Kursänderungen oder ein scharfes Abbremsen eines vorausfahrenden Fahrzeugs rechtzeitig zu reagieren.²²

Im Ergebnis stellte man bei GM fest, dass die damals zur Verfügung stehende Elektronik bei Weitem noch nicht an die Zuverlässigkeit eines Menschen im Fahrbetrieb heran reichte und praktisch nicht einsetzbar war. Die den Versuchen zu Grunde liegenden Studien hatten gezeigt, dass es aufgrund menschlichen Versagens durchschnittlich alle 16 Millionen gefahrene Kilometer zu einem tödlichen Unfall kam. Unfälle mit einem Sachschaden traten demgegenüber bereits etwa alle 100 000 Kilometer auf. Der hohen Zuverlässigkeit der mechanischen Bauteile, die statistisch

20 Bidwell / Cataldo: Electronic Chauffeur may guide car of Future, S. 64 f.

21 Wetmore: Reflecting on the Dream of Automated Vehicles, S. 78.

22 Bidwell / Cataldo: Electronic Chauffeur may guide car of Future, S. 66.

20mal seltener als Menschen für Fälle von Versagen verantwortlich waren, stand die geringe Zuverlässigkeit der elektronischen Bauteile gegenüber. Bei GM erwartete man für den praktischen und sicheren Einsatz des Unicontrol-Systems, dass sich erst alle 320 Millionen Meilen ein tödlicher Unfall ereignen sollte und Sachschäden erst nach 1 Million Meilen. Beides war mit der zur Verfügung stehenden Technik nicht realisierbar.²³

Obwohl das Unicontrol-Projekt nicht zur Serienreife gelangte, wurde auch außerhalb der Fachmedien umfangreich darüber berichtet. Dies geschah im Kontext einer übergeordneten Strategie bei General Motors mit Hilfe von fiktiven positiven Szenarien und Visionen für einen zukünftigen Verkehr, die Verkäufe für andere Produkte anzuregen. So entwickelte GM auch eine Wanderausstellung unter dem Namen „Motorama“, die von 1949 bis 1961 durch die USA zog. Neben den neuesten Fahrzeugmodellen der GM-Palette, wurden den Besuchern auch sogenannte „Showcars“ gezeigt, die nie für eine Serienfertigung bestimmt waren. Zu den bekanntesten dieser Fahrzeuge zählte die „Firebird“-Reihe.²⁴ Mit ihren scharf geschnittenen aerodynamischen Flügeln, auffälligen Lufthutzen und großen Glaskanzeln erinnerten sie optisch mehr an zeitgenössische Militär-Jets der beginnenden Düsenflugzeug-Ära als an PKWs. Auch unter dem Blech arbeitete Luftfahrttechnik: für den Antrieb kamen Gasturbinen zum Einsatz, gesteuert wurde ebenfalls über einen Steuerknüppel.²⁵ Der im Zusammenhang mit der „Motorama“-Ausstellung 1956 produzierte Film „Key to the Future“, zeichnete ein weiteres Zukunftsszenario der Fahrzeugkommunikation auf

23 Ebd.

24 Wetmore: Reflecting on the Dream of Automated Vehicles, S. 79 f.

25 Die Entwicklung und Erprobung von Gasturbinen anstelle der üblichen Kolbenmotoren waren allerdings nicht nur auf die Tätigkeiten bei GM beschränkt. Bereits 1945 begann man bei der englischen Firma Rover mit der Entwicklung des „JET 1“, dem ersten PKW mit einer Gasturbine als Antrieb. 1950 wurde der JET 1 der Öffentlichkeit vorgestellt. In den folgenden Jahren wurden bei Rover noch fünf weitere solcher Prototypen entwickelt und zwischen 1963 und 1965 mit geringem Erfolg auch im 24-Stundenrennen von Le Mans eingesetzt. In den USA war neben GM auch Chrysler auf diesem Gebiet aktiv: Hier wurde das „Turbine Car“ sogar in 50 Exemplaren gebaut und zwischen 1964 und 1966 in einem großem Versuchsprogramm auf seine Praktikabilität geprüft. 203 ausgewählte Kunden erhielten ein „Turbine Car“ leihweise und legten unter Alltagsbedingungen insgesamt 2,1 Millionen Kilometer zurück. Auch andere Hersteller weltweit wie Daimler-Benz, Fiat, Nissan und Renault forschten einige Zeit an diesem Konzept. Letzten Endes war die Gasturbine besonders im Stadtverkehr sehr verbrauchsintensiv und ihre Herstellungskosten zu hoch. Vgl.: von Fersen: Ein Jahrhundert Automobiltechnik, S. 634 ff.

amerikanischen Highways. Zunächst zeigt der Film eine im Stau stehende Familie, die sich über den Zeitverlust ärgert. Nach einem Schnitt folgt ein utopischer Blick in das Jahr 1976: Die Familie ist nun unterwegs in ihrem „Firebird II“. Die Verkehrsüberwachung und -leitung erfolgte nach einem aus der Luftfahrt bekannten Prinzip: Beim Auffahren auf den fast leeren Highway mitten in einer Wüstenlandschaft – und somit dem Überschreiten der Systemgrenze²⁶ hin zu einem regulierten und rhythmisierten Verkehr – war eine Meldung per Funk an den für diesen Abschnitt verantwortlichen Kontrollturm („Mr. Tower Man“²⁷) erforderlich. Nach der Bestätigung durch den Fahrer, dass das Fahrzeug genug Kraftstoff an Bord habe und in gutem Zustand sei sowie der Angabe des Reiseziels, übernahm der Kontrollturm die Führung des Fahrzeugs.²⁸

Die Visionen vom automatisierten Fahren, die GM mit den Ausstellungen „Futurama“ und „Motorama“ sowie mit den Forschungen im Rahmen des Unicontrol-Versuchs skizzierte, waren weit von einer Realisierbarkeit entfernt. Zu den in den Ausstellungen vorgestellten Utopien lieferte GM zunächst keine umsetzbaren technischen Lösungen nach. Insgesamt scheint der Aspekt der Sicherheit, gleichwohl er in der Außendarstellung von GM und in der Kommunikation anderer Unternehmen oder Regierungsstellen immer wieder angeführt wurde, nicht die ausschlaggebende Motivation gewesen zu sein.²⁹ Vielmehr sollten, wie in „Key to the Future“ dargestellt, Aspekte wie Reise-Komfort, beispielsweise durch eine in den Firebird integrierte Eis- und Kaffeemaschine sowie Freiheit und Schnelligkeit, versinnbildlicht durch die fast leeren Straßen, in den Vordergrund gerückt werden.

Die Versuche von GM ließen darüber hinaus keine weiteren Bestrebungen erkennen, über ein Einzelfahrzeug hinaus, den Verkehrsfluss als Gesamt- oder Teilsystem zu verbessern oder aufeinander abzustimmen.³⁰ Die Vorschläge hätten eine gänzlich neue Infrastruktur, zumindest für die Highways, bedurft. Ebenso wäre eine komplett neue Fahrzeuggeneration ohne die herkömmlichen Steuerorgane notwendig gewesen. Neben diesen technischen Aspekten wäre eine umfangreiche Kommunikation und Abstimmung einer Vielzahl staatlicher und privatwirtschaftlicher Stellen erforderlich geworden.³¹

26 Vgl. den Beitrag von Engels in diesem Band, S. 10.

27 Wetmore: Reflecting on the Dream of Automated Vehicles, S. 84.

28 Ebd., S. 80 f.

29 Ebd., S. 82.

30 Ebd., S. 94.

31 Ebd., S. 85f.

Zwischen den späten 1960er und 1980er Jahren kamen die praktischen Großversuche zum autonomen Fahren faktisch zum Stillstand. In den weiterhin zum Thema publizierten Fachbeiträgen wurde wesentlich am von GM erdachten System festgehalten. Die Fahrzeuge sollten weiterhin miteinander über eine Leitung in der Fahrbahn kommunizieren. Nach wie vor wären dabei umfangreiche Änderungen am bestehenden Straßensystem notwendig gewesen. So schlug Harry Chesebrough (1909–1998), Vizepräsident des drittgrößten US-Automobilkonzerns Chrysler und vormals Entwicklungsleiter des „Turbine Car“-Projekts, ein Röhrensystem vor, in dem die elektrisch angetriebenen Fahrzeuge teil- oder vollautomatisiert³² fahren können sollten. In seinem Vorschlag wurde die elektrische Antriebsenergie, nach dem Prinzip der Spielzeug-Autorennbahnen, auch extern durch Kontakte auf der Fahrbahn zugeführt. Wenngleich auch der Vorschlag Chesebroughs eine Utopie geblieben ist, so wurden andere seiner Vorstellungen, wie das sogenannte „Carsharing“ oder elektrische Ladestationen, in jüngster Vergangenheit realisiert.³³

3. 1960er bis 1970er Jahre: Einführung der Fahrzeugelektronik auf breiter Ebene

Die Automobilhersteller weltweit sahen sich ab Mitte der 1960er Jahre einer signifikanten Zunahme an gesetzlichen Regelungen für die Neuzulassung von Kraftfahrzeugen gegenübergestellt. Insbesondere in den USA wurden weitreichende Vorgaben hinsichtlich der Sicherheit und des Umweltschutzes eingeführt. Als wichtigstes Exportland für europäische Automobilhersteller galt es auch für diese, die amerikanischen Gesetze einzuhalten. Ab diesem Zeitpunkt kann daher vom Beginn einer staatlich induzierten „Reglementierungs- und Limitierungsphase in der Automobiltechnik“³⁴ gesprochen werden. Begleitet wurde diese Entwicklung von weltweiten Krisen, die auch die Automobilindustrien betrafen. In der Bundesrepublik endete mit der ersten Wirtschaftskrise nach dem Kriegsende

32 „Or the degree of control could go fully automatic, with the operator indicating to some control medium where he wants to leave the roadway. Here, lane selection, interval spacing, direction, and speed would be automatically controlled. The driver would be free to observe, read, watch television, or you name it.“ Chesebrough: *Cars in the Future*, S. 64.

33 Ebd., S. 64f.

34 Braun / Kaiser: *Energiewirtschaft Automatisierung Information seit 1914*, S. 433.

zwischen 1965 und 1969 das sogenannte „Wirtschaftswunder“. Die beiden Ölpreiskrisen von 1973/74 und 1979 bis 1982 sorgten für globale Unsicherheiten an den Märkten. Größere Auswirkungen auf die technische Entwicklung von Fahrzeugen hatten die zunehmenden sicherheitstechnischen Vorschriften und Auflagen für Abgaswerte und Verbrauch.³⁵ In diesem Kontext änderte sich der Schwerpunkt der kraftfahrtechnischen Forschung hin zur Entwicklung von Automobilen, die diese Vorgaben einhalten konnten. Für die teuren und wenig anwendungsnahen Versuche zum autonomen Fahren fehlten die Ressourcen.³⁶

In diesem Zeitraum vollzog sich dennoch eine Entwicklung, die später für die Realisierung autonomer Fahrzeuge von grundlegender Bedeutung war: Als „Technologielokomotive“³⁷ setzte sich zunehmend die Elektronik und Halbleitertechnik durch. Ab den späten sechziger Jahren drangen insbesondere die integrierten Schaltkreise in Form von „Microchips“ von militärischen Anwendungen, vor allem in der Luft- und Raumfahrt, in massenhaft produzierte, konsumnahe Güter vor.³⁸ Zu diesen zählten neben Heimelektronik auch Automobile. Durch die gestiegenen gesetzlichen Anforderungen an den Verbrauch und die Abgase kamen elektronische Bauteile zunächst vor allem in der Motoren-Regelungstechnik und der Abgasreinigung auf. Neuartige Mikroprozessoren erlaubten nun eine wesentlich exaktere Steuerung von Einspritz- und Zündanlagen. Zudem waren sie gegenüber der Vergaser-Technik deutlich wartungsärmer. Sie ermöglichten so auch die erfolgreiche Entwicklung und Durchsetzung des geregelten Dreiwege-Katalysators.³⁹

Bis in die 1950er Jahre waren, bis auf die Beleuchtungsanlage und erste Autoradios mit Elektronenröhren, fast keine elektronischen Bauteile in Automobilen eingebaut. Ein großer Durchbruch gelang Ford 1961 mit der Einführung des ersten vollständig auf Transistoren basierenden Autoradios. Weitere Innovationen bei Ford waren eine auf der Halbleitertechnik

35 Ebd., 432ff.

36 „Throughout much of the 1970s, US car companies dedicated their research dollars to trying to meet emissions regulations in the Clean Air Act. And in the late 1970s and 1980s, the National Highway Traffic Safety Administration’s push for passive safety technologies like air bags and automatic seat belts may well have distracted car companies from dreaming about automated driving.“ Wetmore: Reflecting on the Dream of Automated Vehicles, S. 82.

37 Schneider: Bewege mich!, S. 32

38 Braun / Kaiser: Energiewirtschaft Automatisierung Information seit 1914, S. 348.

39 Ebd., S. 435.

basierende Zündanlage (1973) oder die erste elektronische Automobil-Uhr (1973). Ein erster konkreter Schritt zum automatisierten Fahren⁴⁰ kam mit dem Einsatz elektronischer Geschwindigkeitsregelanlagen⁴¹.

Diese erste Phase der Einführung elektronischer Bauteile in den Fahrzeugbau erstreckte sich etwa von 1960 bis 1980. Die in diesem Zeitraum entwickelten Aggregate verfügten erstmals über Dioden, diskrete Transistoren und analoge Verstärker. Mit der Einführung dieser neuen Elemente gelang ein deutlicher Qualitätssprung. Autoradios arbeiteten zuverlässiger als ihre Vorgänger mit den empfindlichen Vakuumröhren, die Uhren liefen exakter und die Zündanlagen benötigten weniger Wartungsintervalle, da beispielsweise regelmäßige Wechsel der Unterbrecherkontakte entfielen.⁴² Allerdings überzeugte die neue Technik nicht sofort auf jedem Gebiet: Die amerikanische Firma Bendix hatte seit 1953 an der ersten elektronisch gesteuerten Benzineinspritzung gearbeitet. Bei dieser Anlage erfolgte die Einspritzung der Kraftstoffmenge über Magnetventile. Die Steuerung übernahmen neuartige Transistoren. Sie waren bauartbedingt besser für die Bedingungen im Automobil geeignet als die empfindlichen Röhren. Ab 1958 konnten einige Modelle von Chrysler mit dieser „Electrojector“ genannten Einspritzanlage gegen einen Aufpreis von 640 US-Dollar bestellt werden. Allerdings erwies sie sich, trotz der hohen Zusatzkosten für die Käufer, als sehr unzuverlässig im Alltagsbetrieb. Durch die vielen Kundenbeschwerden nahm Chrysler die Anlage nur ein Jahr später wieder vom Markt und kehrte vorerst zur älteren, jedoch ausgereiften Vergasertechnik zurück.⁴³ In Europa kamen ähnliche Systeme erst später auf den Markt. Hier war es vor allem der Stuttgarter Automobilzulieferer Bosch, der ab Ende der 1960er Jahre, im Rahmen eines Cross-Licence-Abkommens mit Bendix, mit der Entwicklung elektronischer Einspritzanlagen begann.⁴⁴ Dieses Abkommen ermöglichte es beiden Unternehmen, unter Nutzung von Patenten der jeweils anderen Partei, auf den heimischen Märkten führend zu bleiben. Dabei belieferte Bendix den amerikanischen, Bosch den europäischen Markt mit elektronischen Benzineinspritzungen. Die von

40 Dies entspricht der Stufe 1 (Assistiertes Fahren) des eingangs vorgestellten 5-Stufen-Modells der SAE.

41 Der Gattungsbegriff „Tempomat“ für solche Einrichtungen ist von Daimler-Benz seit 1975 als Wortmarke geschützt. Vgl.: Eintrag Registernummer 932012 im Register des deutschen Patent- und Markenamtes. <https://register.dpma.de/DPMAregister/marke/register/932012/DE> (abgerufen am 22.02.2022).

42 Rivard: *Automotive Electronics in the Year 2000*, S. 407 f.

43 Kaiser / Walter: Bosch und das Kraftfahrzeug, S. 109 f.

44 Ebd., S. 108 f.

Bosch ab 1967 entwickelten Steuergeräte für die „D-Jetronic“-Einspritzanlage, die in der US-Version des Volkswagen „1600 LE“ zum Einsatz kamen, waren die ersten komplexeren elektronischen Systeme in Automobilen überhaupt. In der D-Jetronic kommunizierte eine kompakte Steuerungseinheit mit unterschiedlichen Sensoren. Sie interpretierte die Signale und verglich diese mit den vorab in der Entwicklung ermittelten Motorenkennfeldern. Daraus ergaben sich wiederum Steuereingaben beispielsweise für die Einspritzventile. Erst die D-Jetronic ermöglichte die Einhaltung der strengeren Abgasgrenzwerte, die in Kalifornien galten, und damit den Import und die Zulassung auf dem amerikanischen Markt.⁴⁵

Analog zu den einige Jahre zuvor erfolgten Versuchen von GM und RCA bezog auch Bosch externes Wissen aus seinem Tochterunternehmen Blaupunkt aus Hildesheim. Blaupunkt hatte bereits Erfahrungen mit dem Bau von fahrzeuggebundener Unterhaltungselektronik. Ab 1957 waren hier Radios mit Transistoren gefertigt worden, ab 1958 hatte Blaupunkt die ersten Halbleiterregler für Automobil-Lichtmaschinen hergestellt. Daher erfolgte die Fertigung der ersten Steuergeräte für die D-Jetronic in Hildesheim. Erst ab 1969 fertigte Bosch diese im eigens dafür eingerichteten Werk in Reutlingen selbst.⁴⁶

Mit dem Aufkommen von Mikroprozessoren ab Mitte der 1970er Jahre kann der Beginn einer weiteren Entwicklung ausgemacht werden, die sich mit dem ersten Abschnitt überschneidet: Die zunächst unabhängig voneinander arbeitenden Teilsysteme der ersten Phase wurden nun zu kleineren Netzwerken verbunden und begannen miteinander zu kommunizieren. Allen voran in den USA, hielt die Prozessortechnik im Automobil raschen Einzug: Mit der Einführung des „Microprocessed Sensing and Automatic Regulation“-Systems (MISAR) von Delco-Remy ab 1977 kam erstmalig eine mikroprozessorgesteuerte Zündanlage in Fahrzeugen des Modells „Tornado“ von Oldsmobile zum Einsatz.⁴⁷ Bei der von Ford 1978 eingeführten Motorsteuerung „Electronic Engine Control I“ (EEC-I) wurden erstmals mehrere Sensoren mit einem Zentralcomputer verbunden. Mit der Einführung der mikroprozessorgesteuerten λ -Sonde bei Volvo 1977 war es nun möglich, anhand der im Abgas gemessenen Rußanteile, das Kraftstoff-Luft-Gemisch des Motors zu regulieren.⁴⁸

45 Bähr / Erker: Bosch. Geschichte eines Weltunternehmens, S. 456

46 Kaiser / Walter: Bosch und das Kraftfahrzeug, S. 113 f.

47 Simanaitis: MISAR. An electronic Advance, S. 24.

48 Von Fersen: Ein Jahrhundert Automobiltechnik, S. 253.

Ab den späten 1970er und frühen 1980er Jahren kamen als neue Mensch-Maschine-Schnittstelle die ersten Bordcomputer auf den Markt. Der zuerst bei Cadillac für das Modell „Seville“ von 1978 angebotene „Trip Computer“ stellte eine ganze Reihe von Informationen in Echtzeit zur Verfügung. Die 8-bit „central processing unit“ (CPU) des Trip Computer ermittelte jede Viertel-Sekunde die gewünschten Daten für den Verbrauch, die verbliebene Reichweite oder die Motorentemperatur.⁴⁹

Als weitere Innovation, ebenfalls von Bosch, kann die ab 1979 im BMW 732i angebotene „Motronic“ angesehen werden. Hier gelang es, bei der elektronischen Steuerung eines Otto-Motors, die elektronische Benzineinspritzung und die digitale Zündung in einem Steuergerät zusammenzufassen.⁵⁰ Der für Motronic notwendige programmierbare Mikrochip (8-Bit 1802 COSMAC) wurde bemerkenswerterweise von RCA aus den USA geliefert. Die Entwicklung der Motronic spielte für die Frage der Fahrzeugkommunikation eine besondere Rolle: Nach der erfolgreichen Einführung in die Serie bei BMW, entschied man sich hier, auch die neu entwickelten Formel 1-Motoren damit auszurüsten. Die Motronic war dabei nicht nur die erste elektronische Motorsteuerung im Motorsport. Durch eine Funkverbindung konnten die Motor-Leistungs-Daten des Fahrzeugs in Echtzeit während der Fahrt an die Box übertragen werden. Dies ermöglichte wiederum exakte Eingriffe in die Software des Motor-Managements, um das Triebwerk auf die Bedingungen des jeweiligen Rennens abzustimmen.⁵¹

Dieser Abschnitt ist demnach gekennzeichnet von der Einführung einzelner neuartiger elektrischer Bauelemente, die allerdings nicht mit dem Gesamtfahrzeugsystem oder der Umwelt interagierten. Jedoch hatte sich gezeigt, dass es möglich war, Elektronik, die zuverlässig war und Vorteile für die Kunden mit sich bringen konnte, auf breiter Ebene in den Automobilbau einzuführen.⁵²

4. 1980er bis 1990er Jahre: der Weg zum kognitiven Automobil

Als Zwischen-Resümee dieses Beitrags kann festgehalten werden, dass die Bemühungen der Automobilindustrie – hier vor allen Dingen bei GM in

49 Templin: Trip Computer is Microprocessor-Based, S. 56 f.

50 Kaiser / Walter: Bosch und das Kraftfahrzeug, S. 123 ff.

51 An der Einführung der Motronic ist zudem weiter bemerkenswert, dass hier die Innovation aus der Serie in den Rennsport eingingen. Vgl.: Kaiser / Walter: Bosch und das Kraftfahrzeug, S. 128.

52 Rivard: Automotive Electronics in the Year 2000, S. 407 f.

den USA – autonome Fahrzeuge zu entwickeln, bis zu Beginn der 1980er Jahre mehr Science-Fiction gleichen als einer unmittelbaren Innovation. Erst die Erfahrungen von rund 25 Jahren und die Entwicklung von elektronischen Bauteilen und programmierbaren Steuerungseinheiten in der kraftfahrtechnischen Anwendung ermöglichten es ab Mitte der 1980er Jahre, eine erfolversprechendere Grundlagenforschung dazu zu betreiben. Ein entscheidender Aspekt, der bei den bisherigen Bemühungen nur wenig Berücksichtigung gefunden hatte, war es, möglichst auf das bestehende Straßen- und Verkehrsinfrastruktursystem zurückzugreifen. Die Veränderungen sollten im Automobil selbst stattfinden. Von fundamentaler Bedeutung war es daher, dem Automobil durch einen Gesichtssinn die Fähigkeit zur Kommunikation zu verleihen und ihm zu ermöglichen, seine Umwelt wahrzunehmen, um auf Situationen im Straßenverkehr zu reagieren; also ihm kognitive Eigenschaften zu verleihen. Der im Folgenden im Zentrum stehende Zeitraum reicht von etwa 1980 bis in die frühen 1990er Jahre. Diese Phase ist gekennzeichnet von der beginnenden Grundlagenforschung zum autonomen Fahren an Universitäten, auch in Kooperation mit der Industrie, staatlichen und militärischen Behörden. Zudem weitete sich das Thema auch geographisch aus: Lag der bisherige Schwerpunkt eindeutig in den USA, beschäftigten sich seit diesem Zeitraum auch in der Bundesrepublik Deutschland Hochschulen, Behörden und Hersteller mit der Entwicklung kommunizierender Fahrzeuge.⁵³

(a) Forschungen in den USA

Frühe Versuche einem Fahrzeug kognitive Fähigkeiten zu verleihen, fanden bereits zwischen 1964 und 1971 am Artificial Intelligence Laboratory der amerikanischen Stanford University mit dem sogenannten „Stanford Cart“ statt. Bei dieser Versuchseinrichtung handelte es sich allerdings nicht um ein Automobil im engeren Sinne. Vielmehr war das Stanford Cart eine kleine fahrbare Plattform, die mit unterschiedlichen Sensoren zur visuellen Orientierung ausgerüstet war. Dennoch gilt es als „Pionierfahrzeug für den Gesichtssinn“⁵⁴. Bei diesem Projekt stand eine gänzlich andere Zielsetzung im Fokus: Inmitten des sogenannten „Space Race“ rief der US-amerikanische Präsident John F. Kennedy (1917–1963), als Reaktion auf den ersten bemannten Raumflug der Sowjetunion von Juri Gagarin (1934–

53 Anderson / Kalra / Stanley et al.: *Autonomous Vehicle Technology*, S. 55 f.

54 Dickmanns: *Fahrzeuge lernen Sehen*, S. 62.

1968), im April 1960 zum Flug zum Mond auf. In diesem Kontext rückte auch die Frage nach ferngesteuerten Fahrzeugen für die Mondoberfläche in das Blickfeld der Forscher. Die große Entfernung zwischen Erde und Mond verursachte eine Verzögerung der Funksignale um 2,5 Sekunden. Der Ansatz des zur Lösung dieses Problems entwickelten Stanford Cars war es, dem Fahrzeug eine gewisse Autonomie zu verleihen. Beim Stanford Car erfassten die Sensoren lediglich die Daten, die Verarbeitung und die Steuerung erfolgte über externe, stationäre Großrechenanlagen in den Laboren. Das Stanford Car war durch das eingebaute Kamerasystem in der Lage, deutlich erkennbaren weißen Linien auf dem Boden zu folgen.⁵⁵

Ein fahrbereiter PKW wurde erstmals Ende der 1970er Jahre in Japan am Mechanical Engineering Laboratory in Tsukuba realisiert. Dieses Fahrzeug erfasste über zwei in der Front montierte Stereokameras die Leitplanke. Auch die Verarbeitung der Videosignale erfolgte nun an Bord: ein analoger Rechner erfasste die aufgenommenen Bilder und gab diese an einen digitalen Rechner weiter. Auf Grundlage vorab tabellarisch gespeicherter Werte wurde die Lenkung angesteuert und der Wagen fuhr entlang der Fahrbahn, ohne die Leitplanke zu berühren. Die vorhandene Rechenleistung ermöglichte allerdings nur kurze Strecken und langsame Geschwindigkeiten von bis zu 30 km/h.⁵⁶

Wie in kaum einem anderen Bereich der Automobiltechnik zuvor, trat ab Anfang der 1980er Jahre das Militär auf beiden Seiten des Atlantiks direkt in der Grundlagenforschung zum autonomen Fahren in Erscheinung. Im Auftrag des „Strategic Computing Program“⁵⁷ der „Defense Advanced Research Project Agency“ (DARPA), der zentralen US-Rüstungsforschungsbehörde, entstand 1982/83 das vierachsige „Autonomous Land Vehicle“ (ALV).⁵⁸ Das ALV erreichte eine gewünschte Fahrtrichtungsänderung, ähnlich wie Kettenfahrzeuge, über einseitiges Abbremsen der Räder. Im Gegensatz zum Stanford Car der 1960er Jahre hatte das ALV bereits die gesamte für den Fahrvorgang benötigte Hardware an Bord. Als „natio-

55 <https://www.wired.com/brandlab/2016/03/a-brief-history-of-autonomous-vehicle-technology/> (abgerufen am 22.02.2022).

56 Dickmanns: *Fahrzeuge lernen Sehen*, S. 62.

57 Parallel zum ALV-Programm lief das „Army robot vehicle program“. Dessen Ziel war es, ein ferngesteuertes und geländegängiges Kampffahrzeug zu entwickeln. Beide Programme wurden mit einem Budget von insgesamt 600 Millionen US-Dollar über fünf Jahre durch die DARPA finanziert. Vgl.: Leighty / Zimmermann: *Robotic Vehicle research*, S. 444.

58 Turk / Morgenthaler / Gremban et al.: *VITS. A Vision System for Autonomous Land Vehicle Navigation*, S. 343.

nal testbed for autonomous vehicle research“, stand das ALV mehreren Forschungsgruppen zur Verfügung.⁵⁹ In der Zielsetzung des DARPA-Programmes stellte das autonome Fahren nur einen Teilaspekt dar. In der Hauptsache ging es darum, mehr über Künstliche Intelligenz und größere Netzwerk-Architekturen in Erfahrung zu bringen.⁶⁰ Dementsprechend setzten sich die daran beteiligten Forschergruppen ausnahmslos aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz (KI) zusammen.⁶¹ Die ebenfalls am ALV-Programm beteiligte Carnegie Mellon University entwickelte mit dem NAVLAB zudem ein eigenes Forschungsfahrzeug. Herzstück des NAVLAB war das „Autonomous Land Vehicle In a Neural Network“ (ALVINN) auf Basis eines konventionellen Chevrolet-Lieferwagens. Das NAVLAB blieb vergleichsweise lange im Einsatz. Aus dem ersten NAVLAB-Projekt entwickelte die Carnegie Mellon University eine Kleinserie von elf Forschungsfahrzeugen. Ein Meilenstein setzte dabei NAVLAB 5, welches im Rahmen der „No Hands Across America“-Tour von Pittsburgh nach San Diego rund 98% der Strecke autonom steuerte. Beschleunigen und bremsen war weiterhin die Aufgabe des menschlichen Fahrers.⁶²

(b) Forschungen in Deutschland

Im gleichen Zeitraum arbeitete eine deutsche Forschungsgruppe um den Robotiker Ernst Dickmanns⁶³ (*1936) an der Universität der Bundeswehr

59 Diese umfassten eine ganze Reihe der größten US-Rüstungskonzerne und bedeutendsten Hochschulen, dazu zählten: Advanced Decision Systems, die Universität von Columbia, General Dynamics, General Electric, das Honeywell Research Center, das Hughes Artificial Intelligence Center, das Massachusetts Institute of Technology, die Universität von Massachusetts, und die Universität von Rochester. Vgl.: Turk / Morgenthaler / Gremban et al.: VITS. A Vision System for Autonomous Land Vehicle Navigation, S. 343.

60 Ebd., S. 343

61 Dickmanns: Fahrzeuge lernen Sehen, S. 63.

62 Anderson / Kalra / Stanley et al.: Autonomous Vehicle Technology, S. 5

63 Ernst Dickmanns: Dickmanns studierte zwischen 1956 und 1961 Luft- und Raumfahrttechnik an der RWTH Aachen. Im Anschluss forschte er bis 1975 an der damaligen Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL, heute das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR) in Oberpfaffenhofen. Die Forschungsgebiete umfassten die Flugdynamik und die Flugbahnoptimierung. 1964/65 forschte er an der Princeton University und am NASA-Marshall Space Flight Center in Huntsville. 1975 folgte er einem Ruf als ordentlicher Professor für Regelungstechnik an der Universität der Bundeswehr in München. Im Zen-

in München am weltweit ersten Roboterfahrzeug. Dickmanns beschäftigte sich bereits seit 1977 schwerpunktmäßig mit dem Themengebiet des maschinellen Sehens. Von Anfang an spielte die Anwendung in „sehenden Fahrzeugen“⁶⁴ eine wichtige Rolle. Die Finanzierung erfolgte durch private und öffentliche Mittel. Insbesondere die Daimler-Benz AG in Stuttgart beteiligte sich an diversen Fahrzeugumbauten. Im Rahmen von Drittmittelfinanzierungen erhielt der Lehrstuhl Gelder aus dem Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), der Europäischen Gemeinschaft (EG, ab 1992 Europäische Union) und dem Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung (BWB).⁶⁵ Typisch für das deutsche kraftfahrtechnische Innovationssystem war, dass die Grundlagenforschung an einem Hochschulinstitut durchgeführt wurde. Bemerkenswerterweise wussten beide Forschungsgruppen in den USA und in der Bundesrepublik bis Mitte 1984 nichts von den Arbeiten der anderen Seite und gingen davon aus, allein „auf diesem Zukunftsgebiet tätig zu sein.“⁶⁶ Erst im Rahmen einer Tagung des NATO-Advanced-Study-Institute im Juli 1984 erfuhren beide Seiten von den Aktivitäten der anderen Gruppe. Ein größerer Wissensaustausch erfolgte ab November 1986: Anlässlich einer ersten Publikation über das Computersehen der Münchner Gruppe um Dickmanns, bereiste eine deutsche Delegation die University of Maryland und die University of Massachusetts.⁶⁷

Im Gegensatz zu anderen Forschungsgruppen, vor allem in den USA, die von Anfang an auf reale Versuche setzten, entwickelte die Münchener Forschungsgruppe zunächst in mehrjähriger Vorarbeit eine aufwändige Simulationsanlage. Aus diesem Vorgehen ergaben sich zwei Vorteile: Erstens konnten, aufgrund der noch geringen Rechenkapazität der verwendeten Computeranlagen für das maschinelle Sehen, Bewegungsabläufe verlangsamt, in ihrer Dynamik dennoch kontinuierlich angepasst werden. Und zweitens waren sämtliche Umgebungsparameter zur visuellen Erfassung

trum seiner Forschungstätigkeiten stand die Entwicklung eines Simulators für Rechnersehen in Echtzeit. Dieser schuf die Grundlagen für das autonome Fahren und die Entwicklung des maschinellen Sehens. Dickmanns gilt als Pionier auf diesen Gebieten, für seine Forschungen wurden ihm u.a. 2016 der Lifetime Achievement Award des Institute of Electrical and Electronic Engineers und 2017 der Technologie-Preis der Eduard-Rhein-Stiftung verliehen. Vgl.: Dickmanns: *Fahrzeuge lernen Sehen*, S. 70.

64 Ebd., S. 62.

65 Ebd., S. 70.

66 Ebd., S. 63.

67 Ebd.

der Bewegung bekannt. Dies vereinfachte die Qualitätskontrolle des Erkennungsvorgangs.⁶⁸ Die Forschungen unterschieden sich nicht nur hinsichtlich der Vorgehensweise. Während die US-Teams sämtlich aus der KI-Forschung kamen, handelte es sich bei der Münchner Gruppe um Fachleute aus der Systemdynamik und Regelungstechnik. Dieser Umstand ergab sich aus den unterschiedlichen Zielsetzungen beider Projekte: In den USA lag der Fokus vor allem auf einem Erkenntnisgewinn im Bereich der Künstlichen Intelligenz. Das autonome Fahren, und hier insbesondere auch abseits befestigter Straßen, war nur ein Teilaspekt, der dem militärischen Hintergrund der Projekts Rechnung trug. Demgegenüber spielte in München die Entwicklung eines Kamerasystems zur optischen Fahrzeugführung auch bei hohen Geschwindigkeiten auf einer Straße eine zentrale Rolle.⁶⁹

Zusammenfassend führte dieser unterschiedliche fachliche Hintergrund zu einer gänzlich anderen Herangehensweise. Der iterative Ansatz, wie er in der KI-Forschung praktiziert wurde, forderte eine Analyse und Interpretation der einzelnen aufgenommenen Bilder. Um eine Tiefenwirkung zu erreichen, war eine Deutung mehrerer Bilder in Folge notwendig. Dieser Prozess benötigte eine hohe Speicherkapazität, gleichzeitig dauerte die Auswertung eine gewisse Zeit.

Der von Dickmanns verfolgte regelungstechnische Ansatz ermöglichte hingegen, mittels Differentialgleichungen dynamische Prozesse in Echtzeit zu beschreiben. Neben der dreidimensionalen Raumachse ermöglichte dieser Ansatz, auch die Zeit als vierte Dimension in die Kalkulationen mit einzubeziehen. Nur das jeweils letzte Bild einer aufgenommenen Bilderfolge der realen Welt wurde für die Interpretation benötigt. Die gleichzeitige Rückkopplung von Vorhersagefehlern für bestimmte Bildmerkmale der Umwelt zu einem bekannten Aufnahmezeitpunkt ermöglichte die rasche Berechnung der Lage eines Fahrzeugs im Raum.

1983, rund sechs Jahre nach Projektbeginn, wurde im Anschluss an eine Phase der Simulation mit praxisnahen Fahrversuchen begonnen. Es dauerte indes bis 1986, ehe mit dem „Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität

68 Dickmanns: *Fahrzeuge lernen Sehen*, S. 62 f.

69 „The goal of a mobile robot project in West-Germany ist to perform autonomous vehicle guidance on a German Autobahn at high speeds. The current emphasis is on control aspects of the problem, incorporating at high-speed vision algorithm to track road border lines. The system has performed both road-following and vehicle-following in real-time.“ Turk / Morgenthaler / Gremban et al.: VITS. A Vision System for Autonomous Land Vehicle Navigation, S. 343.

und Rechnersehen“ (VaMoRs), einem Transporter auf Basis eines Mercedes-Benz T2, auch in Deutschland ein Forschungsfahrzeug bereitstand. Die zentrale Innovation des VaMoRa bestand in einem „4-D-Ansatz“, der eine „direkte, unmittelbare Wahrnehmung und die Steuerung der räumlich/zeitlichen Prozesse“⁷⁰ ermöglichte. Maßgeblich für diese Technik war die bildliche Erfassung des Verlaufs der Fahrbahn durch Kameras und die Modellierung mathematischer Krümmungsmodelle. Die sicher fahrbare Geschwindigkeit ergab sich aus einer Reihe von Faktoren, die aus definierten Werten des Fahrzeugs (z.B. Achsabstand, Kurvenradien der Räder an Vorder- und Hinterachse, Gierwinkel etc.) und der zu befahrenden Strecke ermittelt wurden. Die Fahrstrecke selbst wurde in einen Fern- und einen Nahbereich eingeteilt. Die Fernsicht erlaubte den Blick in den zukünftigen Fahrverlauf, während aus dem Nahbereich seitliche Korrekturen in der Steuerung vorgenommen wurden.⁷¹

Bereits im Sommer 1987 unternahm das VaMaRo eine autonom gesteuerte Fahrt auf einem 20 Kilometer langen Autobahnabschnitt bei Dingolfing, der noch nicht für den öffentlichen Verkehr freigegeben war. Dabei erreichte es mit 96 km/h eine Höchstgeschwindigkeit, die nur von der Motorleistung des Basisfahrzeugs begrenzt wurde. Der Vergleich mit dem parallel dazu stattfindenden ALV-Projekt verdeutlichte den technischen Sprung: im Juni 1986 erreichte das ALV eine Geschwindigkeit von 10 Km/h auf einer 4,2 km langen Hindernisstrecke. Im folgenden Jahr erreichte es auf gerader Fahrbahn 20 km/h.⁷² Von entscheidender Bedeutung war, dass mit dem visuellen Wahrnehmungssystem ein wichtiger Schritt gelang, auf zusätzliche externe Einrichtungen zu verzichten und auf das bisher verwendete Straßensystem zurückzugreifen.⁷³ Das VaMaRo blieb noch bis 2003 an der Universität der Bundeswehr München im Einsatz. Insgesamt wurden mit ihm drei Generationen an Kamerasystemen für das autonome Fahren entwickelt.⁷⁴

70 Dickmanns: Fahrzeuge lernen Sehen, S. 64.

71 Ebd., S. 64.

72 Turk / Morgenthaler / Gremban et al.: VITS. A Vision System for Autonomous Land Vehicle Navigation, S. 342.

73 Nach der eingangs vorgestellten SAE-Kategorisierung entspricht dieses teilautomatisierte Fahren einem Level 2-System.

74 <https://computerhistory.org/blog/where-to-a-history-of-autonomous-vehicles/> (abgerufen am 22.02.2022).

(c) *PROMETHEUS*

Der Erfolg des Münchner Projekts mit dem maschinellen Sehen führte in den darauffolgenden Jahren zu einer Vielzahl weiterer Forschungsprojekte, die im Wesentlichen in der Industrie und an Hochschulen in Europa durchgeführt wurden. Die Daimler-Benz AG, die bereits Dickmanns Arbeiten unterstützt hatte und noch bis 1996 weiter mit der Münchner Universität der Bundeswehr kooperierte, initiierte und leitete⁷⁵ das zwischen 1987 und 1994 europaweit durchgeführte „PROgRaMme of a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety“ (PROMETHEUS). Bereits die Problemstellung des Projekts zeigte, dass nach der erfolgreichen Grundlagen-Erprobung des 4-D-Ansatzes, die Frage der Anwendung und damit einer gewinnbringenden Vermarktung auch auf breiter ziviler Ebene, rasch in den Interessenfokus der Forschung rückte. Stand bei den ersten Versuchen von GM noch vor allem eine Steigerung des Komforts im Vordergrund, rückte dieser Aspekt bei PROMETHEUS in den Hintergrund. Den zeitgenössischen Herausforderungen des Straßenverkehrs Rechnung tragend, waren die ersten Teilziele eine Erhöhung der Verkehrssicherheit, eine Verbesserung der Umweltverträglichkeit und eine Verringerung des Energiebedarfs, erst an letzter Stelle trat die Frage des Komforts.⁷⁶

Während der Definitionsphase des Projekts 1987, dem „Europäischen Jahr der Verkehrssicherheit“, wurden zunächst über 700 Forschungsprojekte formuliert. Aus diesen wurden 140 durch die beteiligten europäischen Automobilhersteller ausgewählt und als Teilprojekte weiterbearbeitet. Das PROMETHEUS-Teilprojekt „PRO-ART“⁷⁷ setzte direkt an Dickmanns Arbeiten an.⁷⁸ Das zentrale Ziel von PRO-ART war es, die bereits experimentell durchgeführten Versuche mit dem VaMaRo auf eine anwendungsna-

75 Das Projekt ging wesentlich auf den damaligen Leiter der Konzernforschung bei Daimler Benz, Ferdinand Panik (*1942) zurück. <https://idw-online.de/de/news12169> (abgerufen am 22.02.2022).

76 <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko.xhtml?rs=1&oid=9913541> (abgerufen am 22.02.2022).

77 Für ARTificial Intelligence.

78 Alleine am PRO-ART-Teilprojekt nahmen fast alle europäischen Automobilhersteller und rund 60 weitere Forschungsinstitute und Universitäten teil. Aus Deutschland beteiligten sich die Freie Universität Berlin, die Ruhr-Universität Bochum, die Universitäten in Braunschweig, Hamburg, Karlsruhe, Koblenz/Landau, Mainz, Stuttgart, Ulm, sowie die Technische und die Ludwig-Maximilian Universität und weiterhin die Universität der Bundeswehr München. Vgl.: Dickmanns: Fahrzeuge lernen Sehen, S. 65.

here Ebene zu bringen. Dafür waren zwei Aspekte besonders relevant: erstens, die Unabhängigkeit von Kabeln in der Straße zur elektromagnetischen Führung der Fahrzeuge insbesondere bei Kolonnenfahrten, und zweitens, die sukzessive Miniaturisierung der dafür benötigten Hardware. In der ersten Phase des Teilprojekts entwickelte Daimler-Benz unter wesentlicher Zuhilfenahme der Hardware des VaMaRo mit dem „VITA-1“ (Vision Information Technology Application) ein eigenes Forschungsfahrzeug. Bei der ersten Zwischenpräsentation der Forschungsergebnisse 1991 in Turin demonstrierte der VITA-1 erstmals erfolgreich eine autonome Kolonnenfahrt bis zu 60 km/h. Allerdings war die Basis des VITA-1 ebenfalls noch ein Kleintransporter, in welchem sämtliche Mess- und Regelanlagen, die Rechner und ein Stromgenerator Platz fanden.⁷⁹

Ein entscheidender Schritt in Richtung Miniaturisierung erfolgte 1994: Unter weitreichendem Einsatz von bis zu 60 neuen Mikroprozessoren und Transputer (Parallelrechner mit direkter Verbindung zu den benachbarten Prozessoren⁸⁰) wurde der Raumbedarf so weit verringert, dass nunmehr seriennahe PKW eingesetzt werden konnten. Als Versuchsträger dienten nun zwei Mercedes „SEL 500“, die lediglich mit einer weiteren Lichtmaschine zur Deckung des erhöhten Energiebedarfs ausgestattet waren. Jeweils ein Fahrzeug wurde bei Daimler-Benz in Stuttgart und eines an der Universität der Bundeswehr in München erprobt. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass PROMETHEUS den Ausgangspunkt für eine, auch auf internationaler Ebene, gemeinschaftlich organisierte Forschung an Assistenzsystemen darstellte. Viele der hier entstandenen Organisationsformen wurden bei zahlreichen späteren Projekten der Kraftfahrtforschung wieder angewandt.⁸¹ Zudem wurden im Rahmen dieses Projekts erstmals zwei Schlüsseltechnologien, die Verkehrstechnik und die Kommunikationstechnik, zusammengeführt.⁸²

5. Fazit

Aus dem diesem Beitrag zu Grunde gelegten zeitlichen Phasenmodell lässt sich resümierend festhalten, dass zu Beginn der ersten Phase, nach einigen vorwiegend theoretisch gebliebenen Vorläufern, die Themen „Au-

79 Dickmanns: Fahrzeuge lernen Sehen, S. 65.

80 Ebd.

81 Meyer: Innovationspfade, S. 245 f.

82 Prätorius: Das Prometheus-Projekt, S. 11.

tomobil“, „Verkehrslenkung“ und „Kommunikation“ erstmals auf der Weltausstellung von 1939/40 in New York miteinander in Bezug gesetzt wurden. Die im dortigen Pavillon „Futurama“ von General Motors errichteten Dioramen, allen voran eine lebensechte Straßenkreuzung, zeigten Utopien einer möglichen Zukunft im Jahr 1960. Diese waren, schon allein durch die technischen Grenzen und die dafür notwendigen neuen Straßen-Infrastrukturen, weit von einer Realisierbarkeit entfernt. Konkreter wurden die ersten Grundlagenversuche, Automobile selbstständig fahren zu lassen, die ab Mitte der 1950er Jahre ebenfalls durch GM durchgeführt worden waren. Die Hoffnungen, aus den im Zweiten Weltkrieg gemachten großen Fortschritten in der Elektrotechnik rasch zu profitieren, wurden allerdings nicht erfüllt. Die zur Verfügung stehenden Kenntnisse und technischen Mittel reichten bei weitem nicht aus, um einen sicheren und zuverlässigen Fahrbetrieb durch das „Unicontrol-System“ zu gewährleisten. Dennoch wurden die Bemühungen von GM mittels Fachartikeln, Spielfilmen und sogenannten „Showcars“ von einer umfassenden Öffentlichkeitsarbeit begleitet. Die Motivation war, positive Visionen für den zukünftigen Straßenverkehr zu kreieren und den Verkauf der eigenen Produkte anzuregen.

Die zweite Phase zeigt den Zwang der Automobilhersteller weltweit auf, sich zwischen den 1960er und den frühen 1980er Jahren mit den negativen Folgen der massenhaften Motorisierung befassen zu müssen. Die staatlicherseits, anfangs vor allem in den USA, einsetzenden gesetzlichen Regulierungen hatten weltweit umfangreiche Auswirkungen auf die Automobilentwicklung. Für Experimente, die noch fern jeglicher Anwendung lagen, waren keine Ressourcen vorhanden. Dennoch ist dieser Zeitraum von maßgeblicher Bedeutung: Die Halbleitertechnologie und integrierte Schaltkreise setzten sich aus ihrer vorwiegend militärischen Anwendung sukzessive auch in Konsumgütern durch. In Kraftfahrzeugen ersetzten Einspritzanlagen schrittweise die Vergasertechnik, gänzlich neu kam die elektronisch geregelte Abgasreinigung auf. Die hier gemachten Erfahrungen ermöglichten in der Folge erste fahrzeuggebundene und miteinander kommunizierende Systeme und Aggregate. Diese bildeten die Basis für erste Assistenzsysteme zur Entlastung des Fahrers. Zugleich ermöglichten sie eine Sensorik, die es zuließ, sich vom bis dahin vorherrschenden und bremsenden Paradigma einer aufwändigen Anpassung der Straßeninfrastruktur abzuwenden und Versuche zu unternehmen, Automobilen einen Gesichtssinn zu geben.

In der dritten Phase schließlich konnte ab den 1980er Jahren gezielte Grundlagenforschung auf diesem Gebiet betrieben werden. Zwei augenscheinliche Wandel wurden hier ausgemacht: Zum einen wurde diese Forschung in den USA nicht mehr ausschließlich von der Industrie betrieben,

sondern mit großer finanzieller Unterstützung der DARPA und somit des Militärs auch an Universitäten ausgeführt. Und zum anderen wurde nun auch in der Bundesrepublik Deutschland, zunächst durch Daimler-Benz und die Universität der Bundeswehr in München, an kognitiven Fahrzeugen geforscht. Es fallen dabei unterschiedliche Forschungspraktiken auf: In den USA setzten ausschließlich Fachleute aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz von Anfang an auf reale empirische Fahrversuche. In München wurde unter der Leitung des Luft- und Raumfahrttechnikers Ernst Dickmanns zunächst mit mehrjährigen Simulationen zum sogenannten „Rechnersehen“ gearbeitet. Der ab 1987 in München dann auch im Fahrversuch erfolgreich getestete „4-D-Ansatz“, der eine Wahrnehmung der Umwelt durch ein Fahrzeug mittels eines Kamerasystems in Echtzeit ermöglichte, stellte dabei den entscheidenden Durchbruch dar. Das auf diesen Ergebnissen aufbauende Forschungsprojekt PROMETHEUS verband erstmals die Verkehrs- und die Kommunikationstechnik im Spezialbereich des autonomen Fahrens auch wissenschaftlich miteinander. Es ermöglichte die weitergehende Miniaturisierung der Rechentechnik, die für den Einsatz in normalen PKW notwendig ist. Gleichzeitig bildeten sich aus PROMETHEUS neue Formen der Forschungsorganisation und -kooperation heraus, die zum Teil bis heute erhalten geblieben sind.

6. Literaturverzeichnis

- Anderson, James / Kalra, Nidhi / Stanley, Karlyn / Sorensen, Paul / Samaras, Constantine / Oluwatola, Oluwatobi (Hrsg.): *Autonomous Vehicle Technology. A Guide for Policymakers*. Santa Monica, 2014.
- Bähr, Johannes / Erker, Paul: *Bosch. Geschichte eines Weltunternehmens*, München, 2013.
- Bidwell, Joseph / Cataldo, Roy: „Electronic Chauffeur may guide car of Future“, in: *Automotive Engineering, SAE Journal* 9 (1958), S. 64–67.
- Borchers, Detlef: „Vor 70 Jahren. Die Welt von morgen war auch einmal besser“, online abgerufen unter: <https://www.heise.de/ct/artikel/Vor-70-Jahren-Die-Welt-von-morgen-war-auch-einmal-besser-301540.html>
- Braun, Hans-Joachim / Kaiser, Walter: *Energiewirtschaft, Automatisierung, Information seit 1914. Propyläen Technikgeschichte*, Bd.5, Berlin, 1997.
- Chesebrough, Harry: „Cars in the Future. An Engineer dreams ahead“, in: *Automotive Engineering, SAE Journal* 10 (1965), S. 64–65.
- Dickmanns, Ernst: „Fahrzeuge lernen Sehen. Der 4-D-Ansatz brachte 1987 den Durchbruch“, in: *Naturwissenschaftliche Rundschau* 72 (2019) 2, S. 61–70.

- Eckl-Dorna, Wilfried: „Die 5 Level des autonomen Fahrens. Diese Stufen müssen Autobauer bei Roboterautos nehmen“, in: *Manager Magazin* vom 17.03.2019, <https://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/selbstfahrende-autos-die-5-stufen-des-autonomen-fahrens-erklart-a-1256773.html> (abgerufen am 22.02.2022)
- Fersen, Olaf von: *Ein Jahrhundert Automobiltechnik. Personenwagen*, Düsseldorf, 1986.
- Kaiser, Walter: *Bosch und das Kraftfahrzeug. Rückblick 1950–2003*, Stuttgart, 2004.
- Kreuzer, Bernd: „Die Stadt und das Auto“, in: *Kultur & Technik. Das Magazin aus dem Deutschen Museum. Die mobile Stadt. Konzepte für ein besseres Miteinander* 43 (2019) 4, S. 10–15.
- Leighty, Robert / Zimmermann, Bruce: „Robotic Vehicle Research“, in: *The Military Engineer* 77 (1985) 502, S. 444–45.
- Meyer, Uli: *Innovationspfade. Evolution und Institutionalisierung komplexer Technologie*, Wiesbaden, 2016.
- o.V.: „Fahrerloser Regelbetrieb. Deutschland übernimmt Pionierrolle für autonomes fahren“, in: *Manager Magazin*, 21.05.2021.
- Prätorius, Gerhard: *Das Prometheus-Projekt. Technikentstehung als sozialer Prozeß*, Wiesbaden, 1993.
- Rauner, Felix / Hitz, Hermann / Spöttl, Georg (Hrsg.): *Expertise 3. Wissenschaftliche Begleitung zur Neuordnung der fahrzeugtechnischen Berufe. Aufgabenanalyse für die Neuordnung der Berufe im Kfz-Sektor. Fahrzeugkommunikationstechnik. 2. Zwischenbericht*, Bremen, 2002.
- Rivard, Jerome: „Automotive Electronics in the Year 2000“, in: *SAE Transactions* 95 (1986) 4, S. 406–423.
- Schneider, Stefan-Alexander: „Bewege mich! Die Geschichte des Autos ist im weitesten Sinne die Geschichte der Assistenzsysteme für den Fahrzeugführer“, in: *Kultur & Technik. Das Magazin aus dem Deutschen Museum. Die mobile Stadt. Konzepte für ein besseres Miteinander* 43 (2019) 4, S. 28–35.
- Simanaitis, Dennis: „MISAR. An electronic Advance“, in: *Automotive Engineering, SAE Journal* 85 (1977) 1, S. 24–29.
- Templin, Robert: „Trip Computer is Microprocessor-Based“, in: *Automotive Engineering, SAE Journal* 86 (1978) 10, S. 56–61.
- Turk, Matthew / Morgenthaler, David / Gremban, Keith / Marra, Martin: „VITS. A Vision System for Autonomous Land Vehicle Navigation“, in: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 10 (1988) 3, S. 342–361.
- Wetmore, Jameson: „Reflecting on the Dream of Automated Vehicles. Visions of Hands Free Driving over the past 80 years“, in: *Technikgeschichte* 87 (2020) 1, S. 69–94.