

Zum Stand der autonomen optischen Fahrzeugführung, ein Blick ins PROMETHEUS-Forschungsprogramm

Leonhard, Werner

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 1992 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.135-144



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

WERNER LEONHARD, Braunschweig

Zum Stand der autonomen optischen Fahrzeugführung, ein Blick ins PROMETHEUS-Forschungsprogramm*

Einführung und Aufgabenstellung

Die EG fördert seit einigen Jahren umfangreiche Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Fahrzeug- und Verkehrslenkung mit elektronischen Mitteln, um die in den meisten Industrieländern immer schlimmer werdende Verkehrsnot, vor allem in den Ballungsgebieten zu lindern. Hierzu gehören Navigationssysteme ebenso wie fahrzeug-fahrweg-bezogene Kommunikationsverfahren, um entstehende Verkehrsstaus zu erkennen oder Unfälle, z. B. an Kreuzungen, zu vermeiden. Die meisten Forschungsthemen sind langfristig angelegt, sie werden in den verschiedenen Ländern von der Kraftfahrzeug-Industrie und Forschungsinstituten gemeinsam bearbeitet. In Deutschland hat das Bundesministerium für Forschung und Technologie die Regie übernommen, es bedient sich dabei der Fraunhofer-Gesellschaft als Projektbegleiter.

Im folgenden wird über ein Teilprojekt berichtet, das vom Institut für Regelungstechnik der TU Braunschweig gemeinsam mit der Volkswagen AG bearbeitet wurde [6,7]. Vorhaben mit ähnlichem Ziel sind an verschiedenen Stellen außerhalb und innerhalb des PROMETHEUS-Programmes zu finden, doch stehen dabei meist andere Aspekte im Vordergrund des Interesses [2, 4, 5, 11].

Ziel des Vorhabens „Autonome Fahrzeugführung mit optischem Sensor“ war das automatische Lenken des Fahrzeugs auf autobahnähnlichen Straßen anhand seitlicher Fahrbahnmarkierungen, gewöhnlich ein Seitenstreifen und ein Mittelstreifen. Als Sensor dient eine kleine elektronische Fernsehkamera, die in der Mitte der Windschutzscheibe in Bereich des Rückspiegels fest angebracht ist; die Lenkung erfolgt über einen Stellantrieb, ähnlich wie bei einer herkömmlichen Lenkhilfe. Außer der Fahrzeug-Querführung wurde in einem weiteren Teil des Vorhabens in Zusammenarbeit mit der Ruhr-Universität Bochum auch die autonome Längsführung mit Gaspedal und Bremse als Stellglied untersucht, d. h. eine Geschwindigkeitsregelung bzw. das Folgen eines vorausfahrenden Fahrzeugs; dies ist jedoch nicht Gegenstand dieses Berichtes.

Selbst wenn in absehbarer Zeit alle technischen Probleme einer autonomen Fahrzeugführung mit vertretbarem Aufwand lösbar wären, gäbe es doch andere Gründe, etwa Fragen der Gewährleistung bei Unfällen, die den Einsatz eines Autopiloten in Straßenfahrzeugen in der näheren Zukunft eher unwahrscheinlich machen; dagegen könnte ein automatischer Kopilot, der den Fahrer zwar auf Gefahren aufmerksam macht, ihm aber letztlich die Verantwortung überläßt, einen praktikablen Ansatz darstellen. Um vertrauenswürdige Warnungen etwa beim Einfahren in eine Kurve, abzugeben, müßte der Kopilot allerdings im Prinzip in der Lage sein, das Fahrzeug auch selbst zu lenken.

* Vortrag bei der Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft am 19. Juni 1992.

Die Untersuchungen erfolgten sowohl theoretisch, d. h. durch Rechnersimulation, als auch experimentell, wobei der in Bild 1a skizzierte Kleinbus als Versuchsfahrzeug Verwendung fand.

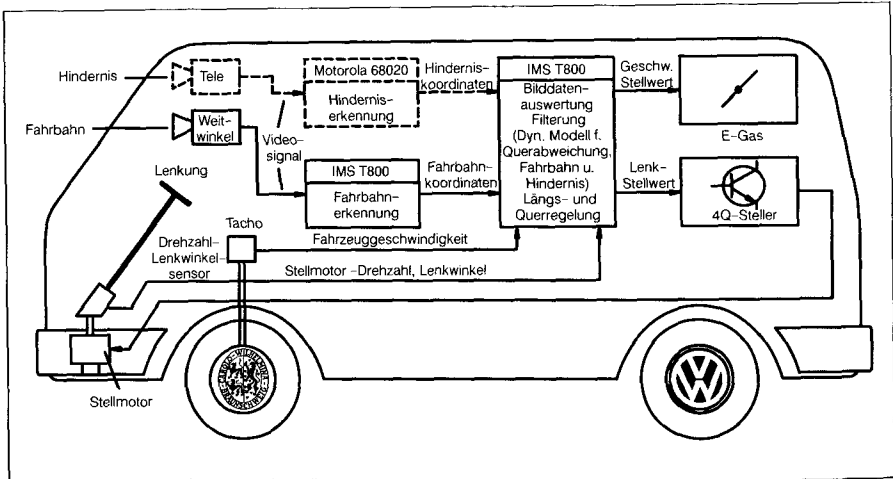


Bild 1a:
Versuchsfahrzeug

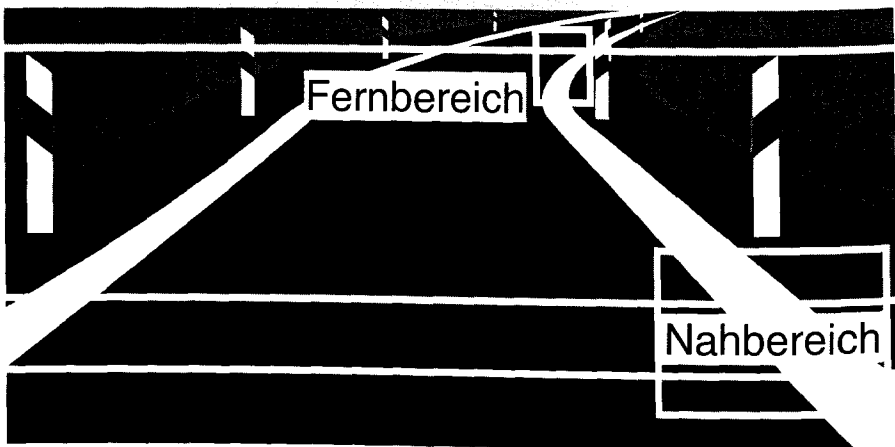


Bild 1b:
Kamerabild

Die elektronische Kamera für die Seitenführung bildet über ein Weitwinkel-Objektiv den etwa 5–25 m vor dem Fahrzeug liegenden Bereich zweidimensional ab (Bild 1b); die Signale sind nach Fernsehnorm formatiert und liefern alle 40 ms ein volles Bild, dessen Auflösung natürlich durch die Körnung des CCD-Sensors (512 x 512 Pixel) begrenzt und durch unvermeidliche Bewegungen von Kamera und Fahrzeug gestört ist. In einer Entfernung von 25 m beträgt die Auflösung des Sensors etwa 5 cm. Aus der im Rechner gespeicherten Bildfolge mit 256 Grauwerten je Pixel sind nun die der Straßenmarkierung entsprechenden „optischen Kanten“ zu extrahieren. Dies geschieht nach verschiedenen Verfahren der Bildauswertung durch ein Programm, das die interessierenden Bildbereiche definiert und auf Helligkeitskontraste hin analysiert. Die zugehörigen Auswertungsprogramme, bei denen es vor allem auf Störungsunempfindlichkeit und Rechengeschwindigkeit ankam, wurden in einer Nachfolgeinstitution der früheren Akademie der Wissenschaften in Berlin entwickelt [10]. Für die umfangreichen Rechnungen in Echtzeit bei der Bildauswertung, der Transformation von Bild- in Raumkoordinaten, der Berechnung und Interpolation dynamischer Zustände der Fahrzeugbewegung, sowie der Ermittlung des erforderlichen Lenkwinkels, also der Regelung des Fahrzeugs, ist eine erhebliche Rechenleistung erforderlich, die ein Mikrorechnernetz auf der Basis von TRANSPUTER-Modulen bereitstellt. Es sind dies Mikrorechner, die sich dank ihres Aufbaus leicht vernetzen lassen. Alle TRANSPUTER-Knoten arbeiten an physikalisch abgrenzbaren Teilaufgaben parallel und stehen periodisch mit ihren Nachbarknoten in Verbindung. Aus Sicherheitsgründen ist die Regelung so zu gestalten, daß die Lenkung sich jederzeit von Hand übernehmen läßt. Die Fahrversuche überdecken einen Geschwindigkeitsbereich vom Stillstand bis etwa 120 km/h auf Versuchsstrecken. Nachfolgend seien einige Einzelheiten des Vorhabens erläutert.

Versuchsaufbau und Lösungsweg

Für die Regelung stehen außer Fahrzeuggeschwindigkeit (Raddrehzahl) und Lenkwinkel die von der Bildanalyse gelieferten Schätzwerte von Seitenabweichung und Gierwinkelfehler zur Verfügung, die somit als Abtastwerte im Rhythmus der Bildverarbeitung anfallen. Die Bilddaten sind wegen wechselnder Fahrbahnoberflächen, z.B. infolge von Straßenreparaturen, Unterbrechung der Fahrbahnberandung, veränderliche Beleuchtung, ferner auch wegen der nicht berücksichtigten Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeuges stark gestört, so daß vor der weiteren Verwendung eine Filterung unumgänglich ist. Dies gilt insbesondere auch für den Versuch, die Krümmung der weiter vorausliegenden Fahrbahn zu schätzen; für einen menschlichen Fahrer ist dies eine zur Verbesserung der Seitenführung wichtige Größe. Auch der sog. Kurswinkel als Richtung des Geschwindigkeitsvektors des Fahrzeuges und seine Abweichung gegenüber der des Fahrbahn-Randstreifen läßt sich aus der zeitlich diskreten Bildfolge nicht unmittelbar gewinnen. Zur Filterung und Interpolation wird deshalb ein dynamisches „Modell“ der Fahrzeugbewegung relativ zur Fahrbahn, ein sog. Beobachter, fortlaufend berechnet, der die Störsignale reduziert und auch nicht meßbare Größen, etwa den sog. Schwimmwinkel β als Differenz von Kurs- und Gierwinkel, liefert. Das verein-

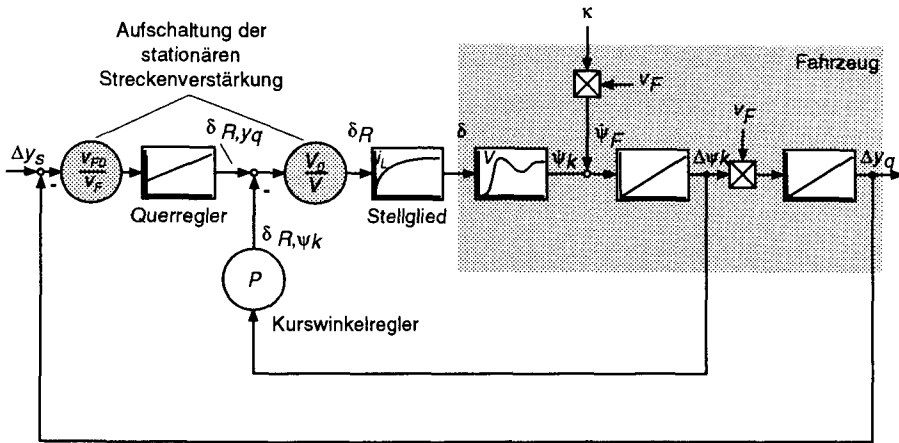


Bild 3:
Zweischleifige Regelung der Seitenbewegung mit innerer Kurswinkelregelung

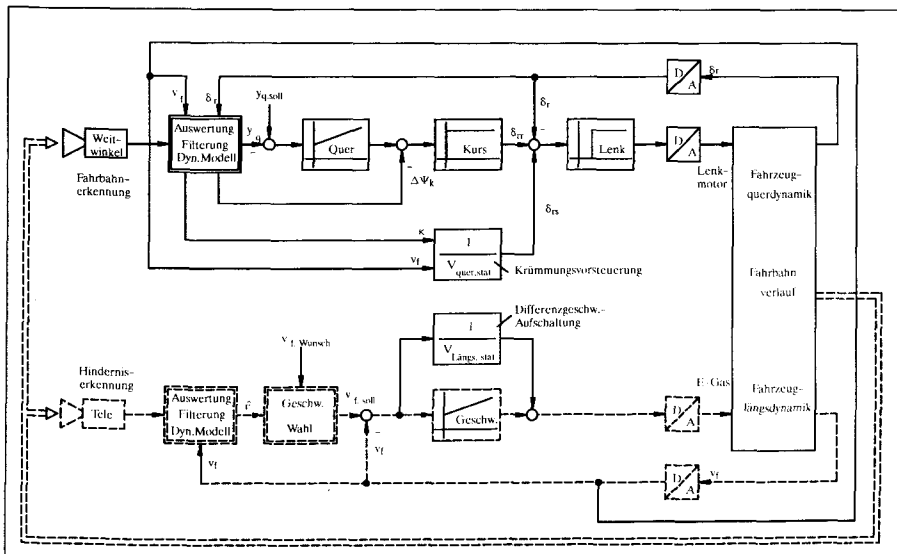


Bild 4:
Blockschaltbild der Fahrzeugregelung

Hochsprache programmiert wird, was die Fehlersuche erleichtert; ein 32 bit Multiplikationsbefehl wird von einer T800 Einheit in etwa 0,2 μs ausgeführt. Zwei TRANSPUTER-Knoten sind auf je einer gedruckten Karte im Europa-Format (100 x 160 mm) untergebracht. Das Rechnernetz benötigt eine elektrische Leistung von etwa 80 W und kann aus der Bordstromversorgung gespeist werden.

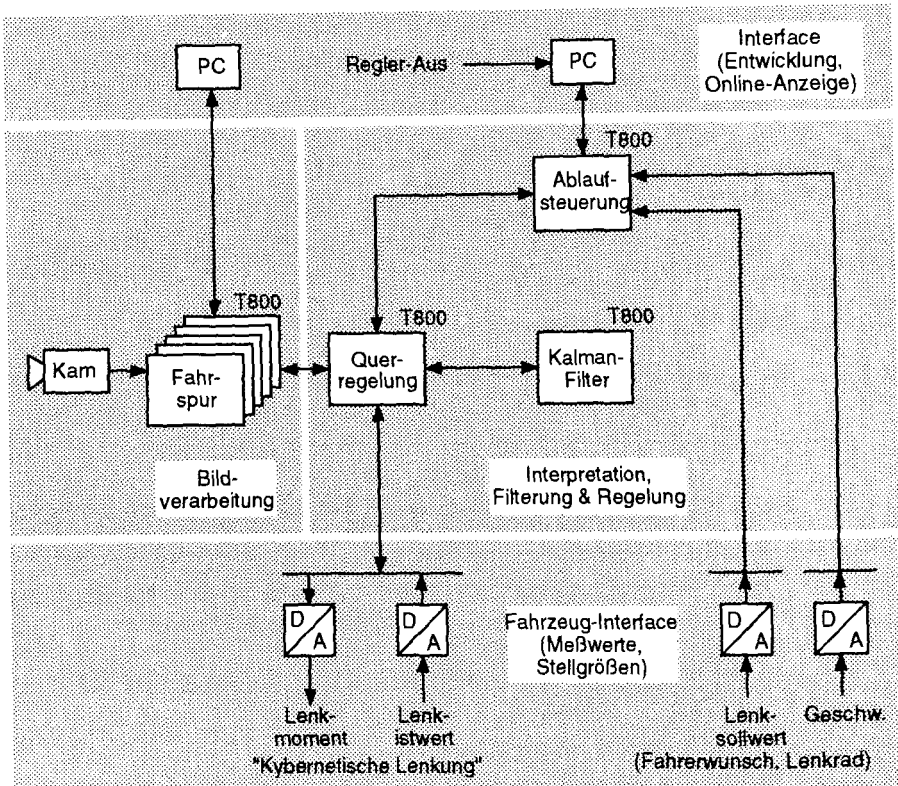


Bild 5:
Verteiltes Rechnersystem

Einige Ergebnisse

Wegen des technischen und kostenmäßigen Aufwandes, aber auch der bei Fahrversuchen erforderlichen Sicherheitsvorkehrungen, wurde das gesamte System einschließlich Fahrzeug, Fahrweg, Signalverarbeitung und Regelung zunächst umfangreichen Simulationstests unterzogen, wobei sämtliche Komponenten und ihr Zusammenspiel durch Rechnermodelle abgebildet wurden. In einem ersten Schritt erfolgte die Simulation „Off-line“ mit dem Programmpaket ACSL und ohne Rücksicht auf den Rechenzeitbedarf. Nachdem die prinzipielle Funktionsfähigkeit nachgewiesen war, wurden die Programme in die TRANSPUTER-Programmiersprache OCCAM für Echtzeitbetrieb umgeschrieben. Der später im Fahrversuch verwendete Rechner teil war dabei über analog/digitale Schnittstellen mit dem zunächst ebenfalls auf TRANSPUTERN nachgebildeten Systemteil (Fahrbahn, Fahrzeug, Kamera) verbunden. In Bild 6 ist das Ergebnis eines Regelversuchs anhand eines Spurwechsels gezeigt. Der zeitliche Verlauf des Sollwertes für den Seitenversatz y_q wird dabei durch ein sog. Führungsfilter verschliffen, um heftige Reaktionen des Reglers zu vermeiden, die von Mitfahrenden als unangenehm empfunden würden.

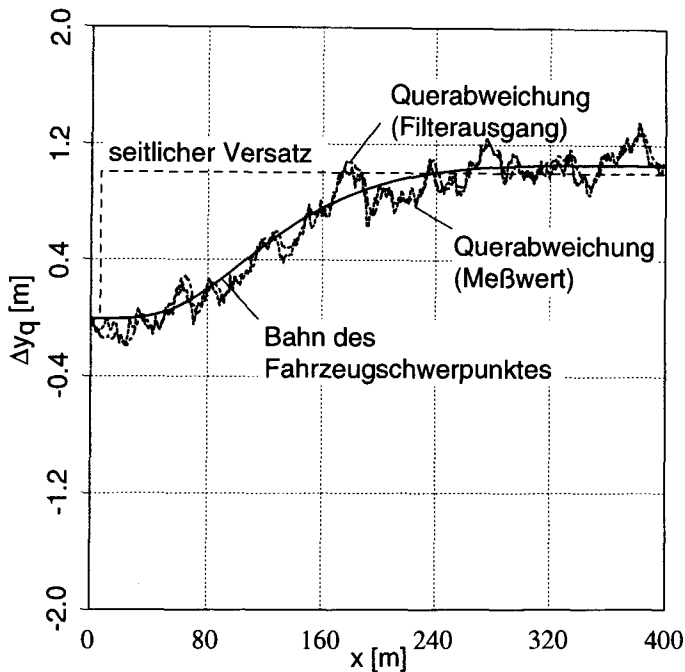
Spurwechsel bei $v_F = 20$ m/s

Bild 6:

Spurwechsel bei einer Geschwindigkeit von 20 m/s (Simulation)

In Bild 7a und 7b sind schließlich Ergebnisse von echten Meßfahrten dargestellt, die ein Durchfahren einer leicht überhöhten Kurve mit einem Krümmungsradius von 305 m mit am Beginn und Ende angefügten Klothoiden zeigen; die Geschwindigkeit betrug $v_F = 17$ ms (61 km/h). Das Fahrzeug ist dabei einmal autonom (Bild 7a) und das zweite Mal (Bild 7b) von einem geübten Fahrer gesteuert. Man erkennt die stark veräuschten Signale, die in beiden Fällen auf gleiche Weise entstanden sind. Es zeigt sich, daß der autonome Regler besser als der Fahrer in der Lage ist, die vorgegebene seitliche Abweichung stationär einzuhalten; allerdings hat der Regler wegen des noch fehlenden Schätzwertes für die vorausliegende Fahrbahnkrümmung Schwierigkeiten, sich beim Ein- und Ausfahren auf die als Störgröße wirkende Krümmungsänderung einzustellen.

Eine Verbesserung des Fahrverhaltens durch Schätzung der vorausliegenden Fahrbahnkrümmung würde eine erhöhte Auflösung des Kamerabildes im Fernbereich erfor-

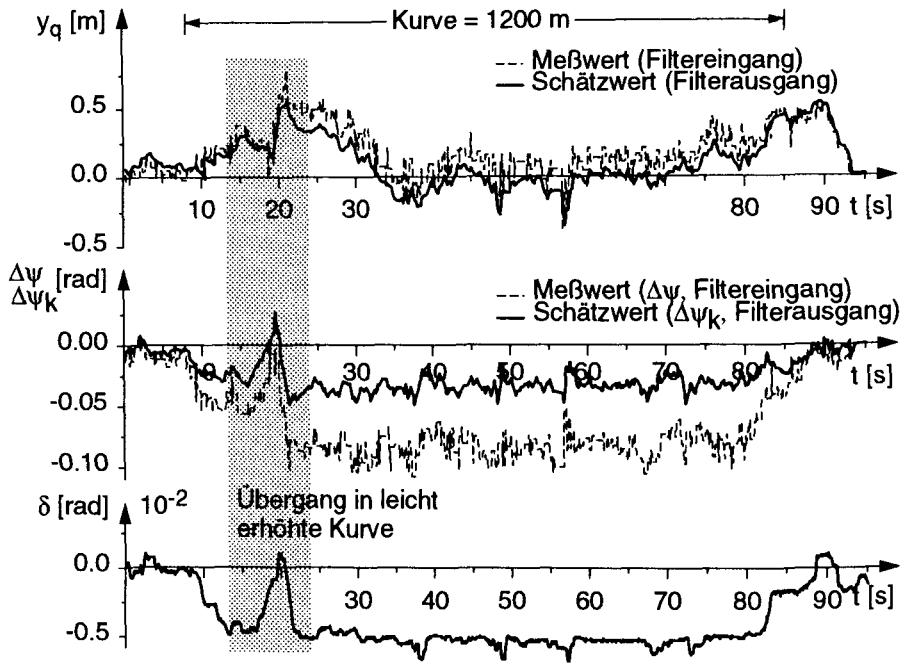


Bild 7a

Fahrversuche durch eine Linkskurve mit $v_F = 17$ m/s
autonome Lenkung

dern. Weitere noch nicht ausreichend untersuchte Einflüsse sind die Seiteneigung und Wölbung der Fahrbahn sowie das Durchfahren von längsgeneigten oder verwundenen Fahrbahnen. Da, wie anfangs erwähnt, der praktische Einsatz solcher Autopiloten in absehbarer Zeit nicht geplant ist und von den meisten Autofahrern wohl auch nicht akzeptiert würde, sind die Arbeiten nach gründlicher Dokumentation zum vorläufigen Abschluß gekommen.

Zusammenfassung

In dem Bericht werden die Ergebnisse eines im Rahmen des PROMETHEUS-Programmes geförderten Forschungsvorhabens beschrieben, um ein Fahrzeug mit optischem Sensor auf autobahn-ähnlichen Fahrbahnen autonom zu führen. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß das Problem prinzipiell zwar ohne übermäßigen technischen Aufwand lösbar ist, doch sind wichtige Fragen noch offen. Hierzu gehören generelle Nachteile eines optischen Sensors, z.B. bei einer Schneedecke, auf längere Stücke unterbrochene Fahrbahnmarkierung oder Blendung. Auch Fragen der Betriebssicherheit und Redundanz wurden nicht untersucht.

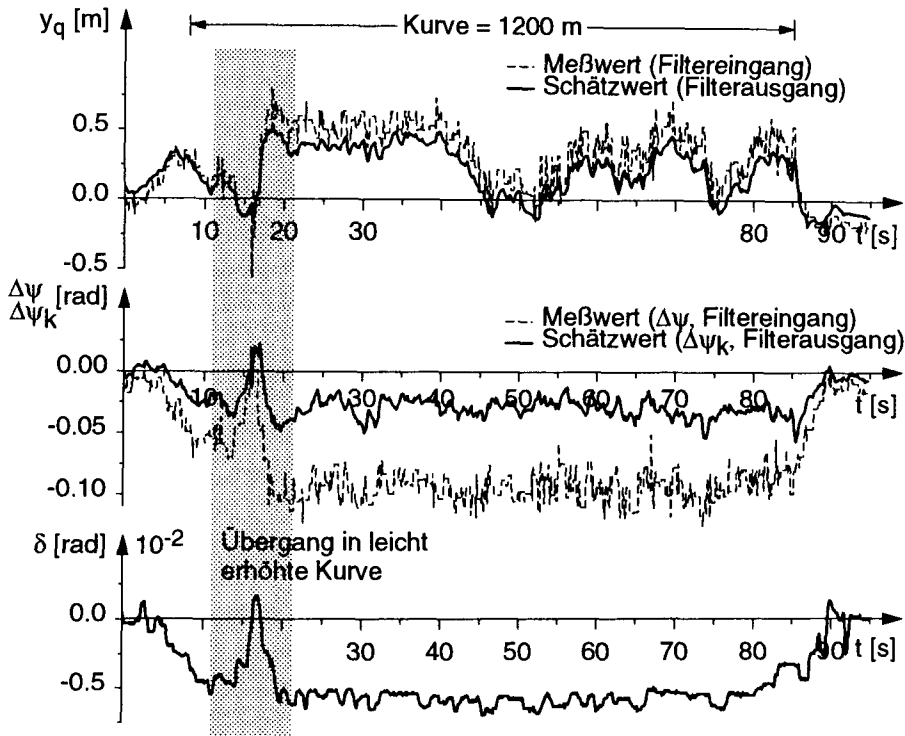


Bild 7b:

Fahrversuche durch eine Linkskurve mit $v_F = 17\text{m/s}$
Lenkung durch geübten Fahrer

Der Verfasser dankt Herrn Dipl.-Ing. J. Manigel, der die Untersuchungen im Rahmen seiner Forschungsarbeit am Institut für Regelungstechnik ausgeführt hat. Unser gemeinsamer Dank gilt der VW-Forschung, insbesondere den Herren Dr. Rackow, Wilm, Zimdahl und Herrn Weisser, sowie dem BMFT, das durch Bereitstellung der Mittel die Voraussetzungen für diese Arbeiten geschaffen hat.

Literatur

- [1] Brammer, K., Siffling, G.: Kalman-Bucy-Filter. Oldenbourg Verlag, 1975.
- [2] Dickmanns, E.D., Zapp, A.: A Curvature-based Scheme for Improving Road Vehicle Guidance by Computer Vision. Proceedings of SPIE, Vol. 727, Mobile Robots, pp. 161–168, 1986.
- [3] Doyle, J., Glover, K., Khargonekar, P., Francis, B.A.: State Space Solutions to Standard H_2 - und H_∞ -Control Problems. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-25, No. 3, 1980.
- [4] Fenton, R.E., Selim, I.: On the Optimal Design of an Automotive Lateral Controller. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 37, No. 2, pp. 108–113, 1988.
- [5] Jurgen, R.K.: Smart cars and highways go global. IEEE-Spectrum, pp. 26–36, May 1991.

- [6] Manigel, J.: Bahnführung eines Straßenfahrzeugs durch Computervision. Zwischenberichte PROMETHEUS-Pro Art, 1989–1992.
- [7] Manigel, J., Leonhard, W.: Vehicle Control by Computer Vision. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 39, 1992, pp. 181–188.
- [8] Mitschke, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge. Band C, Fahrverhalten, Springer Verlag, 2. Aufl., 1990.
- [9] Müller, K.: Ein Entwurfsverfahren für selbsteinstellende, robuste Regelungen. Diss. TU Braunschweig, 1991.
- [10] Winter, H., Bieber, E., Schilling, T.: Fahrspurerkennung und Kurvendetektion. Zwischenberichte PROMETHEUS-Pro-Art, 1991–92.
- [11] Zimdahl, W.: Regelungstechnische Probleme bei dem leitkabelgeführten Kraftfahrzeug. Diss. TH, Darmstadt, 1961.

Prof. Dr. Ing. Dr. h.c. Werner Leonhard
Am Schiefen Berg 32 · W-3440 Wolfenbüttel