

Objektivierung des Fahrerleistungsvermögens

Objectifying the driver performance

Dipl.-Ing. **J. Bergholz**, Dr.-Ing. **R. Henze**, Prof. Dr.-Ing. **F. Küçükay**,

TU Braunschweig, Institut für Fahrzeugtechnik
Hans-Sommer-Str. 4, 38106 Braunschweig, Tel.: 0531-391-2610
j.bergholz@tu-bs.de, r.henze@tu-bs.de, f.kuecukay@tu-bs.de

Abstract

Aiming at an increased road safety and a reduced number of accidents, the research and development of motor vehicles focuses more and more on the driver. This is due to the fact that, apart from the vehicle condition, the driver and his actual ability to drive a vehicle safely are essentially important for avoiding accidents.

The most recent research approaches of identifying the driver performance (DP) can be divided into two methods, the direct and the indirect method. In the first case, the method requires additional sensor systems, which monitor the driver or his actions directly. The indirect method includes all approaches that allow conclusions about the driver performance by acquiring parameters and their time changes, which specify the interaction between driver, road and vehicle (DRV parameter space).

In the scope of this article, two approaches and selected results of the indirect method are presented.

The first approach is based on the analysis of how the driver keeps the vehicle in the lane, detected with a track monitoring system. By means of defined objective parameters, which characterise the driver-specific lane keeping behaviour, conclusions about the current driver performance can be drawn.

The second approach is the identification from driver response characteristics. Conclusions about the current driver performance can be drawn by means of a driver model for lateral vehicle guidance and identified objective parameters. Based on a correlation and regression analysis, the objective parameters of both approaches are rated and appropriate objectification models, based on objective parameters, are generated.

Kurzfassung

Die Zielsetzungen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und der Reduktion von Unfällen haben zur Folge, dass zunehmend der Fahrer in das Visier der Forschung und Entwicklung am Kraftfahrzeug gerät. Die Ursache liegt darin, dass neben der Erfassung des Fahrzeugzustandes auch der Fahrer und seine aktuelle Fähigkeit ein Fahrzeug sicher zu führen eine wesentliche Rolle bei der Unfallvermeidung spielen.

Die jüngeren Forschungsansätze zur Identifikation des Fahrerleistungsvermögens (FLV) lassen sich in zwei Methoden differenzieren, in die direkte Methode und die indirekte Methode. Im ersten Fall sind die Methoden mit zusätzlicher Sensorik verbunden, welche den Fahrer oder Aktionen des Fahrers direkt beobachten. Die indirekte Methode beinhaltet alle Ansätze, die durch die Erfassung von Parametern und deren zeitliche Änderungen, welche das Zusammenspiel zwischen dem Fahrer, dem Fahrzeug und der Fahrumgebung (3F-Parameterraum) beschreiben, Aussagen über das Fahrerleistungsvermögen treffen.

Im Rahmen des Beitrags werden zwei Ansätze und ausgewählte Ergebnisse der indirekten Methode vorgestellt.

Der erste Ansatz basiert auf der Analyse des Spurhalteverhaltens des Fahrers, detektiert mittels eines Fahrspurüberwachungssystems. Anhand definierter Kennparameter zur Charakterisierung des fahrerspezifischen Spurhalteverhaltens werden Rückschlüsse auf seine aktuelle Leistungsfähigkeit gezogen.

Der zweite Ansatz ist die Identifikation aus dem Fahrerübertragungsverhalten. Anhand eines Fahrermodells für die Fahrzeugquerführung werden mittels identifizierter Kennparameter Aussagen über das aktuelle Fahrerleistungsvermögen getroffen. Auf Basis einer Korrelations- und Regressionsanalyse werden die Kennparameter beider Ansätze bewertet und geeignete kennparameterbasierte Modelle zur Objektivierung herausgestellt.

1 Einleitung

Die Fahraufgabe wird heute trotz der Zunahme von unterstützenden Assistenzsystemen allein durch den Fahrer erfüllt. Neue Assistenzsysteme zeichnen sich in erster Linie durch einen warnenden und informativen Charakter aus. Die Güte der Erfüllung der Fahraufgabe durch den Fahrer hängt somit grundsätzlich von seiner Fähigkeit zur Fahrzeugführung ab, charakterisiert durch seine Konstitution, seine Erfahrung und nicht zuletzt durch sein „Talent“. Zusätzlicher Einfluss lässt sich durch den aktuellen Ablenkungs- und Aufmerksamkeitsgrad des Fahrers erkennen. Zusammengefasst entsteht das Fahrerleistungsvermögen, d.h. das Vermögen des Fahrers, das Fahrzeug sicher und unfallfrei im komplexen Verkehrsumfeld zu führen.

Das Potential der Fahrerbeobachtung und Fahrerleistungsbeurteilung verdeutlicht sich in Abbildung 1. In 85% der Unfälle im Jahre 2006 war mindestens eine der Unfallursachen ein Fehlverhalten des Fahrers [14]. Diese Betrachtung der Unfallursachen verdeutlicht die Annahme, dass die Kenntnis des Fahrerleistungsvermögens und eine situativ angepasste Assistenz ein deutliches Potential zur Verbesserung der Verkehrssicherheit aufweisen. Im Rahmen aktueller Forschungs- und Entwicklungsfragestellungen wird das Thema der Kondition (Müdigkeit) bevorzugt betrachtet. Der Ansatz der Ermittlung des Fahrerleistungsvermögens in seiner Gesamtheit dient der ganzheitlichen Fahrer Betrachtung um sowohl fahrerspezifische, als auch müdigkeits- und aufmerksamkeitsbedingte Einflüsse auf die Fahrzeugführung des Fahrers analysieren zu können.

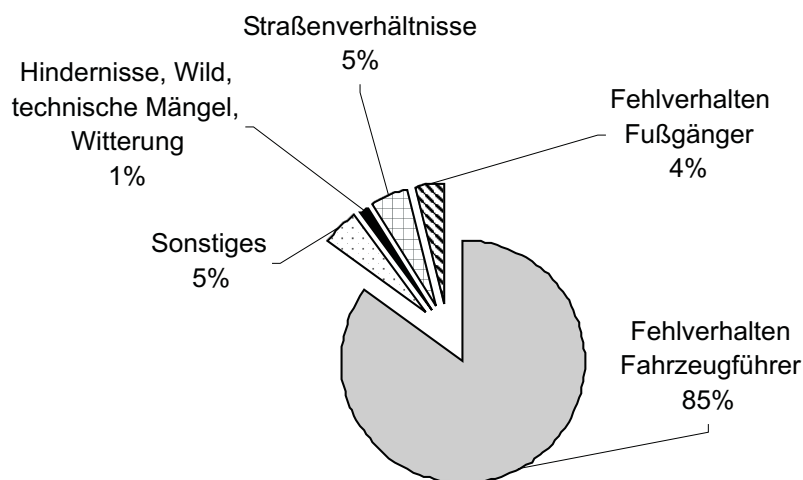


Abbildung 1: Unfallursachen in 2006 [14]

Die heute geläufigen Ansätze und Methoden zur Identifikation des Fahrerleistungs- vermögens lassen sich in zwei Hauptgruppen unterteilen, in die direkten und die indi- rekten Methoden. Die direkten Methoden kennzeichnen sich durch das Prinzip der unmittelbaren Fahrerbeobachtung, beispielsweise mittels eines kamerabasierten Eye-Tracking-Systems. Die indirekten Methoden verwenden Informationen, die aus Fahrumgebungs- und Fahrzustandssensoren zur Verfügung stehen und leiten das Fahrerleistungsvermögen durch eine indirekte Fahrerbeobachtung beispielsweise durch sein Fahrverhalten ab. Im Folgenden werden ausgewählte Ansätze beider Me- thoden kurz vorgestellt.

Direkte Methoden

Im Rahmen der direkten Methoden haben sich zwei Forschungsschwerpunkte her- auskristallisiert, zum einen die Müdigkeits- und zum anderen die Aufmerksamkeitser- kennung. Beide Schwerpunkte sind zumeist miteinander verbunden. Ein Großteil der aktuellen Forschungsansätze basiert auf der Beobachtung der Augen, teilweise der Mimik und von Kopfbewegungen. Die meisten der Systeme sensieren mittels einer vor dem Fahrer positionierten Kamera seine Blickzuwendung und typische Größen der Müdigkeit [9, 13]. Zur Ermittlung dieser Müdigkeitsgrößen wie Lidschlussfre- quenz, Öffnungswinkel des Augenlids und Lidschlusszeiten wird mittels einer geeig- neten Bildverarbeitung die Lage des Fahrerauges bzw. der Pupille ausgewertet [vgl. 6, 9, 13]. Aktuell sind von einigen Herstellern kommerzielle Systeme verfügbar. An- dere Ansätze der direkten Fahrerbeobachtung beziehen sich auf die Messung weite- rer physiologischer Daten, wie Herzrate (Herzraten-Variabilität), Atemfrequenz und der Hirnaktivität [13]. Diesen Methoden gemeinsam ist die Notwendigkeit der direkten Ausstattung des Fahrers mit Sensoren wie beispielsweise eines Pulsmessers.

Indirekte Methoden

Die indirekten Methoden zur Identifikation des Fahrerleistungsvermögens basieren auf der Beobachtung des Fahrerverhaltens, indem Parameter der Fahrumgebung und des Fahrzeugs analysiert werden [3, 4, 5]. Sie stützen sich dabei zumeist auf messtechnisch erfasste fahrzeuginterne Parameter (z.B. Lenkradbewegungen, Pe- dalstellungen, Beschleunigungen) bzw. Parameter aus den vorhandenen Fahrerass- sistenzsystemen (wie Spurmitten- und Gierwinkelfehler, Abstandshaltung zum vo- rausfahrenden Fahrzeug) [vgl. 5, 7]. Das geläufigste Verfahren der indirekten Metho-

de ist die Detektion der Fahrspur. Die Güte der Fahrzeugführung durch den Fahrer wird über der Zeit sensiert und analysiert. Wesentliche Parameter zur Bewertung des Fahrerleistungsvermögens sind die Spurabweichungen, sowie ihre Anteile über der Zeit oder das Spurwechselverhalten des Fahrers. Ein System der indirekten Methode befindet sich aktuell bei Volvo im Serieneinsatz. In Verbindung mit einem kamerabasierten Spurverlassenswarner wird bei dem System „*Driver Alert*“ die Fahrweise des Fahrers analysiert, zwischen einem „kontrollierten“ und einem „unkontrolliertem“ Fahren unterschieden und dem Fahrer in einer fünfstufigen Balkenform angezeigt (Volvo Car Corporation 2007). Ein weiterer Ansatz der indirekten Methode ist die Identifikation des Fahrerleistungsvermögens aus dem Fahrerübertragungsverhalten. Hierzu werden die Parameter betrachtet, die den Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Fahrumsgebung beschreiben. Die Änderung des Fahrersteuer- und -regelverhaltens ist das Maß für das Fahrerleistungsvermögen.

Am Institut für Fahrzeugtechnik sind die indirekten Methoden zur Identifikation des Fahrerleistungsvermögens seit mehreren Jahren Forschungsschwerpunkt.

2 Fahrversuche

In den vergangenen Jahren wurden mehrere systematische Versuchsreihen zur Identifikation des Fahrerverhaltens und des Fahrerleistungsvermögens durchgeführt. Im Folgenden werden die Fahrversuche und ausgewählte Ergebnisse vorgestellt.

2.1 Versuchsreihe „Fahrerleistungsvermögen I“

In 2003 wurde eine umfangreiche Versuchsreihe zum Fahrerleistungsvermögen anhand von Spurverlassungswarnungen abgeschlossen [7, 8, 12]. Besonderes Augenmerk lag hier auf dem Vergleich der Spurverlassungswarnungen aufgrund von Unaufmerksamkeit (Ablenkung durch Nebenaufgabe) und den Warnungen verursacht durch die abnehmende Leistungsfähigkeit des Fahrers. Während der Fahrt (560km mit überwiegendem Autobahnanteil von 530km) wurden neben den Fahrzeuggrößen und den Messdaten eines Lane-Departure-Warning-Systems der subjektive Eindruck des Fahrers zu seiner Müdigkeit, seinem Leistungsvermögen, dem Pausenwunsch und eine Beurteilung des Fahrerleistungsvermögens durch den Beifahrer aufgenommen. Zusätzlich wurden die Aktivitätsphasen und die Inaktivitätsphasen des Fahrers anhand ausgewählter Größen (Lenkwinkel, Blinker, Beschleunigungen) ermittelt [11, 12].

Die grundsätzlichen Ergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen [7]:

- Über der Fahrzeit wird ein Abwärtstrend des Fahrerleistungsvermögens sowohl in den subjektiven Urteilen, als auch anhand der Aktivitätsüberwachung und der durchschnittlichen Spurverlassenswarndauer deutlich.
- Bei Ablenkung des Fahrers durch Nebenaufgaben findet eine Erhöhung der Warndauern statt.
- Zwischen der Warndauer und dem Fahrerleistungsvermögen wird eine Korrelation gezeigt.

Damit wurde das Potential der indirekten Methoden zur Identifikation des Fahrerleistungsvermögens nachgewiesen.

2.2 Versuchsreihe „Fahrerleistungsvermögen II“

In der zweiten Versuchsreihe werden zwei neue Ansätze der indirekten Methode zur Identifikation des Fahrerleistungsvermögens untersucht [3, 4, 5].

Im Rahmen dieser neuen Testreihe führen insgesamt 9 Probanden (männlich und weiblich) 17 Versuchsfahrten auf zwei vorher definierten Versuchstrecken (Mittel- und Langstrecke) ab. Das Versuchsfahrzeug ist neben umfangreicher Messtechnik zur Aufnahme aller Fahrzeugbewegungsgrößen mit einem Fahrspurüberwachungssystem ausgerüstet. In regelmäßigen Zeitabständen beantwortet der Fahrer die Frage nach seiner subjektiven Leistungsfähigkeit und seinem Sekundenschlafisiko. Zusätzlich bewertet der Beifahrer die Fahrerkonditionierung und die Verkehrslage.

Für beide Fahrstrecken wurde die Kommunikation mit dem Beifahrer auf ein Minimum reduziert, da diese den Fahrer zusätzlich ablenken bzw. aktiv halten würde.

Im ersten Schritt wurden die subjektiven Beurteilungen der Probanden und des Beifahrers ausgewertet. Hierzu wurde zwischen der Mittel- und der Langstrecke unterschieden.

Exemplarisch werden hier die Kernaussagen zusammengefasst [3, 4, 5]:

- Bei allen Fahrten wird ein Abfall des subjektiven Leistungsempfindens der Probanden mit unterschiedlich starker Ausprägung deutlich.
- Der Verlauf des über alle Fahrten gemittelten Leistungswerts verdeutlicht diesen Abfall über der Zeit.
- Das empfundene Sekundenschlafisiko steigt zum Ende der Fahrt deutlich an.

- Nach einer Pause macht sich bei den Probanden ein Erholungseffekt durch den Wiederanstieg des subjektiven Leistungswerts bemerkbar.
- Für Nachtfahrten lässt sich feststellen, dass die Fahrer mit einem geringeren Leistungswert starten, der relative Leistungsabfall lässt allerdings keinen deutlichen Unterschied mehr erkennen.
- Die subjektiven Aussagen der Probanden zeigen, dass eine drei- bzw. fünf-stündige Fahrt einen spürbaren Leistungsabfall zur Folge hat.

Der Beifahrer nimmt analog dem Fahrer einen Abfall des Leistungsvermögens wahr. Er zeigt jedoch die Tendenz das Fahrerleistungsvermögen niedriger einzustufen. Die vom Fahrer gewünschte Restfahrzeit bis zur Pause nimmt mit zunehmender Fahrzeit ebenfalls ab.

Die Auswertung der subjektiven Beurteilungen der Probanden über die jeweilige Fahrt verdeutlicht klar den Leistungsabfall des Fahrers. Weiterhin wird die Annahme bestätigt, dass eine längere Strecke insgesamt einen höheren Leistungsabfall zur Folge hat als eine kürzere. Der Einfluss der Fahraufgabe hinsichtlich der Ermüdung zeigt sich hier als gering. Bei der Mittelstrecke, die ohne Fahranweisung befahren wurde, ist innerhalb der ersten drei Stunden ein ähnlicher Leistungsabfall zu erkennen wie im Rahmen der Langstreckenversuche.

2.3 Versuchsreihe „Fahrerleistungsvermögen III“

Das Institut für Fahrzeugtechnik beschäftigt sich aktuell mit einer dritten Versuchsreihe zur Identifikation des Fahrerleistungsvermögens. Die Eckdaten sind in Tabelle 1 wiedergegeben.

Tabelle 1: Eckdaten Versuchsreihe Fahrerleistungsvermögen III

	Anzahl	Alter
Probanden	30	20-80 Jahre
	Tag	Nacht
Strecke	600km	200km
Anzahl Fahrten	60	30

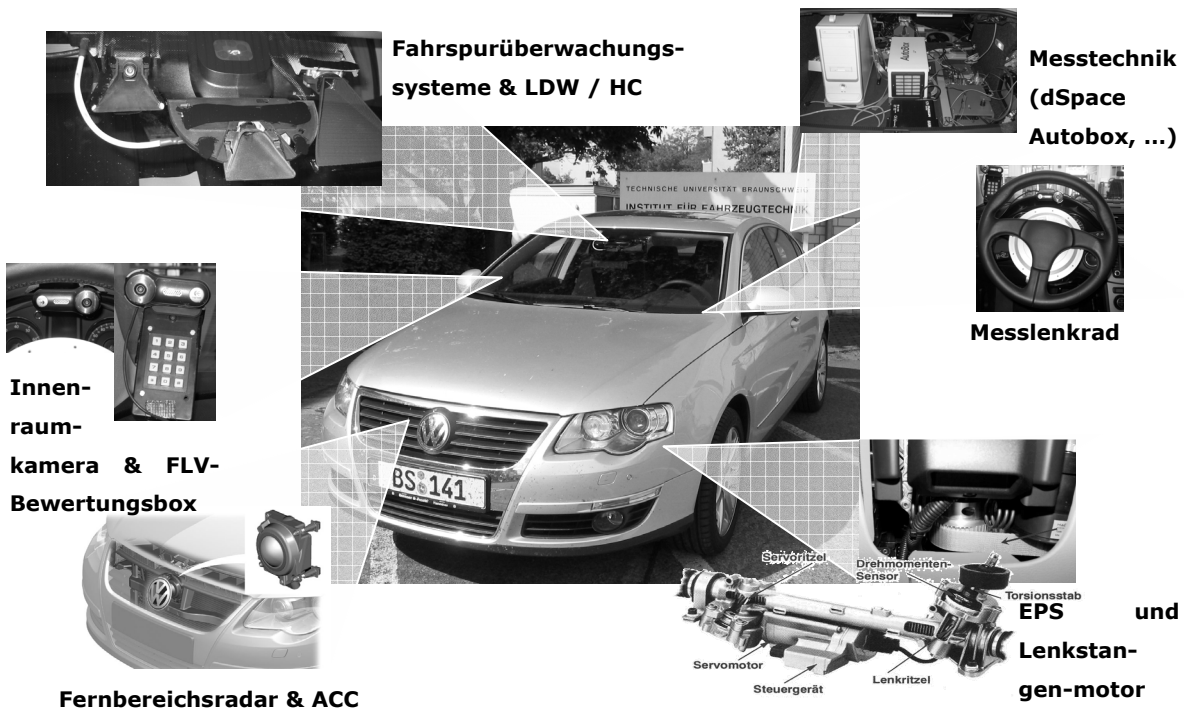


Abbildung 2: Experimentalfahrzeug mit Messtechnik und Sondereinbauten

Versuchsträger ist hier ein Experimentalfahrzeug, das durch integrierte Kamera- und Umgebungssensorik ermöglicht, das Spurhalteverhalten des Fahrers und die Umgebungsbedingungen zu sensieren (Abbildung 2). Neben den Stellgrößen (z.B. Lenkradwinkel- und Pedalstellung) und den typischen Fahrzeugbewegungsgrößen (z.B. Querbewegung, Gierrate) werden die Ausgangsdaten der Kameras (u.a. Spurversatz, Gierwinkelfehler) und des Fernbereichsradars (u.a. Abstände, Relativgeschwindigkeiten) mit aufgenommen.

Während der Versuchsfahrten geben die Fahrer in einheitlichen Zeitabständen Angaben zu ihrem subjektiven Leistungsempfinden.

Die Skala der subjektiven Urteile wird an die Karolinska Sleepiness Scale (KSS) [1] angelehnt (Tabelle 2). Mittels einer Bewertungsbox mit einem Tastenfeld werden die Fahrer in regelmäßigen Zeitabständen durch das Aufleuchten einer roten LED in ihrem Sichtbereich dazu angehalten, ihr subjektives Leistungsempfinden gemäß der in Tabelle 2 aufgeführten Skala zu beurteilen.

Zusätzlich wird mittels Innenraumkameras das Verhalten der Fahrer beobachtet und aufgezeichnet.

Tabelle 2: Skala subjektive Leistungswerte nach KSS

Wert	Definition englisch	Definition deutsch
1	very sleepy, great effort to keep awake, fighting sleep	sehr schläfrig, sehr stark angestrengt nicht einzuschlafen, Schlaf bekämpfend
2	sleepy, some effort to stay awake	schläfrig, etwas anstrengend wach zu bleiben
3	sleepy, no effort to stay awake	schläfrig, keine Mühe wach zu bleiben
4	some signs of sleepiness	einige Anzeichen von Schläfrigkeit
5	neither alert nor sleepy	weder munter noch schläfrig
6	rather alert	eher munter
7	alert	munter
8	very alert	sehr munter / wach
9	extremly alert	extrem munter / wach

3 Identifikation des Fahrerleistungsvermögens

Zur Identifikation des Fahrerleistungsvermögens werden zwei Ansätze herangezogen. Der erste Ansatz basiert auf der Analyse des Spurhalteverhaltens des Fahrers. Der zweite Ansatz bezieht sich auf das Fahrerübertragungsverhalten.

3.1 Spurhalteverhalten des Fahrers

Im Rahmen der betrachteten Fahrsituation hat der Fahrer die Aufgabe, das Fahrzeug in der von ihm erkannten Fahrspur zu halten und zu führen. Spurbabweichungen und ihre Anteile über der Zeit werden als ein Maß für das Fahrerleistungsvermögen verwendet. Unterschieden werden hier zum einen die Fähigkeit des Fahrers, das Fahrzeug in der Spur zu halten (Spurhaltungsgüte), und zum anderen das Vermögen des Fahrers, einen korrekten Spurwechsel (Spurwechselgüte) durchzuführen. Im Folgenden wird die Spurhaltegüte betrachtet.

Um das Spurhalteverhalten des Fahrers auch unter Berücksichtigung von Tendenzen des verstärkt links- und rechtsseitigen Fahrens zu dokumentieren werden 17

Kennparameter definiert (Abbildung 3) und für feste Zeitabschnitte der Gesamtmessung berechnet [3]:

- Summe / Mittelwert der Abweichungen zur Spurmitte $LP_{Sum, MW}$ [m]
- Flächeninhalte der Abweichung zw. Spurmittendurchgang $A_{pos, neg}$ [m²]
- Summe / Mittelwert der Beträge der Flächeninhalte $A_{Sum, MW}$ [m²]
- Extrema der Abweichung zw. Spurmittendurchgang $Amp_{pos, neg}$ [m]
- Summe / Mittelwert der Beträge der Extrema $Amp_{Sum, MW}$ [m]
- Periode / Frequenz zw. Spurmittendurchgang T_A [s], f_A [Hz]
- Summe / Mittelwert der Periode / Frequenz $T, f_{Sum, MW}$ [s]
- Effektivwert der Abweichung EFF [m]

Bis auf den Effektivwert beschreiben die Kennparameter die Abweichungen / Fehler gegenüber der Nulllage der Spurmitte. Der Effektivwert hingegen beschreibt die Abweichung gegenüber der „gefahrenen Spurmitte“ des Fahrers, also den Fehler gegenüber der fahrerindividuellen Spurlage.

Abbildung 3 zeigt den Abstand zur Spurmitte [m] über der Zeit für einen kurzen Zeitabschnitt der Gesamtmessung. Der Spurmittenabstand mit dem Wert Null ist durch die gepunktete Linie gekennzeichnet, die fahrerindividuelle Spurmitte ist gestrichelt dargestellt.

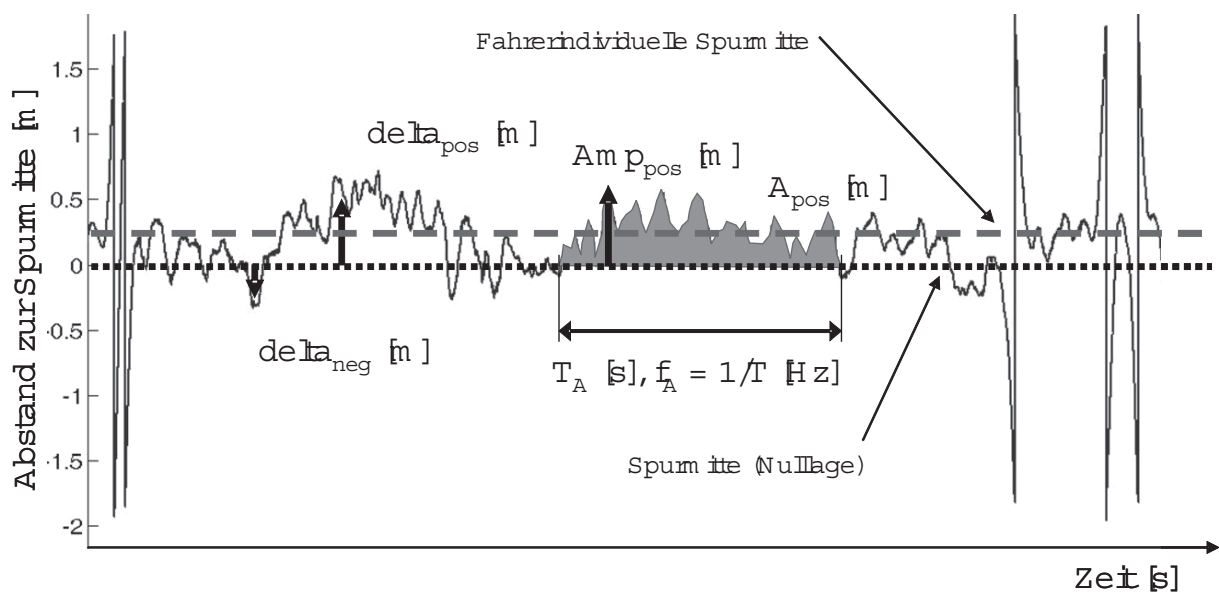


Abbildung 3: Visualisierung Kennparameter aus Spuralteverhalten

Zur Ermittlung der links- und rechtsseitigen Abweichungen werden, wie durch Pfeile angezeigt, die Anteile in negative bzw. positive Richtung aufsummiert. Die Flächeninhalte der Abweichungen ergeben sich durch Integration der entsprechenden Abschnitte zwischen den Nulldurchgängen. Die Extrema zwischen zwei Spurmitten durchgängen stellen das Minimum bzw. das Maximum der Abweichung dar. Die Periode beschreibt den Zeitabschnitt von Null- zu Nulldurchgang der Spurmitte, die Frequenz ergibt sich analog. Die Kennparameter werden für die Messungen über einen vorgegebenen Zeitraum Δt ermittelt. Um die Kennparameter nicht durch die im betrachteten Zeitfenster durchgeführten Spurwechsel zu verfälschen, müssen diese identifiziert und ausgeblendet werden [4, 5].

Die Analyse des Fahrerverhaltens hinsichtlich seiner zeitlichen Änderung und im Kontext der Leistungsabnahme verdeutlicht ein charakteristisches Bild für die einzelnen Probanden, als auch für identifizierbare Fahrerklassen. Im ersten Schritt wurden die Kennparameter für jeden einzelnen Fahrer analysiert und anschließend der Anteil der Probanden, bei denen die Kennparameter signifikant im Zusammenhang mit dem Leistungsvermögen stehen ermittelt (Probandensensitivität). Die Probandensensitivität ist in der Tabelle 3 wiedergegeben. Aufgeführt sind die Kennparameter, die eine Sensitivität von mindestens 65% aufweisen.

Tabelle 3: Probandensensitivität auf die Kennparameter in Prozent

Kennparameter	Summe / Mittelwert Abweichungen	Effektivwert	Summe / Mittelwert Extrema	Mittelwert Periode
Probandensensitivität	75 % / 75 %	65%	80 % / 65 %	70 %

Als Voraussetzung für die Bestimmung der Sensitivität wird in diesem Fall verstanden, dass die Probanden sowohl eine subjektive Änderung ihres Leistungsvermögens ausgemacht haben, als auch dass eine deutliche Änderung der Kennparameter über der Fahrtzeit auftritt. Im Folgenden werden die aufgeführten Kennparameter an einer Versuchsfahrt und Versuchsperson beispielhaft verdeutlicht und die identifizierte leistungsbedingte Änderung des Spurhalteverhaltens dargelegt. Die subjektiven

Urteile des Fahrers spiegeln eine Abnahme des subjektiven Leistungsempfindens über der Fahrzeit wider [3].

Abbildung 4 zeigt die Summe, den Mittelwert und den Effektivwert der gefahrenen Abweichungen zur Fahrspurmitte aufgetragen über Zeitintervalle der Gesamtfahrt. Die Summe (oben) und der Mittelwert (Mitte) der Spurmittenabweichung (Fehler vs. Nulllage) fallen mit zunehmender Fahrzeit und dem subjektiv wahrgenommenen Leistungsvermögens des Fahrers ab. Dies spricht für eine Änderung des Fahrstils des Fahrers zu einem Fahren absolut näher an der Spurmitte bzw. einem verstärktem Regeln um die Spurmitte. Der Anstieg des Effektivwerts der Spurmittenabweichung (Fehler vs. individueller Spurlage) wiederum verdeutlicht eine Erhöhung der effektiv gefahrenen Abweichungen.

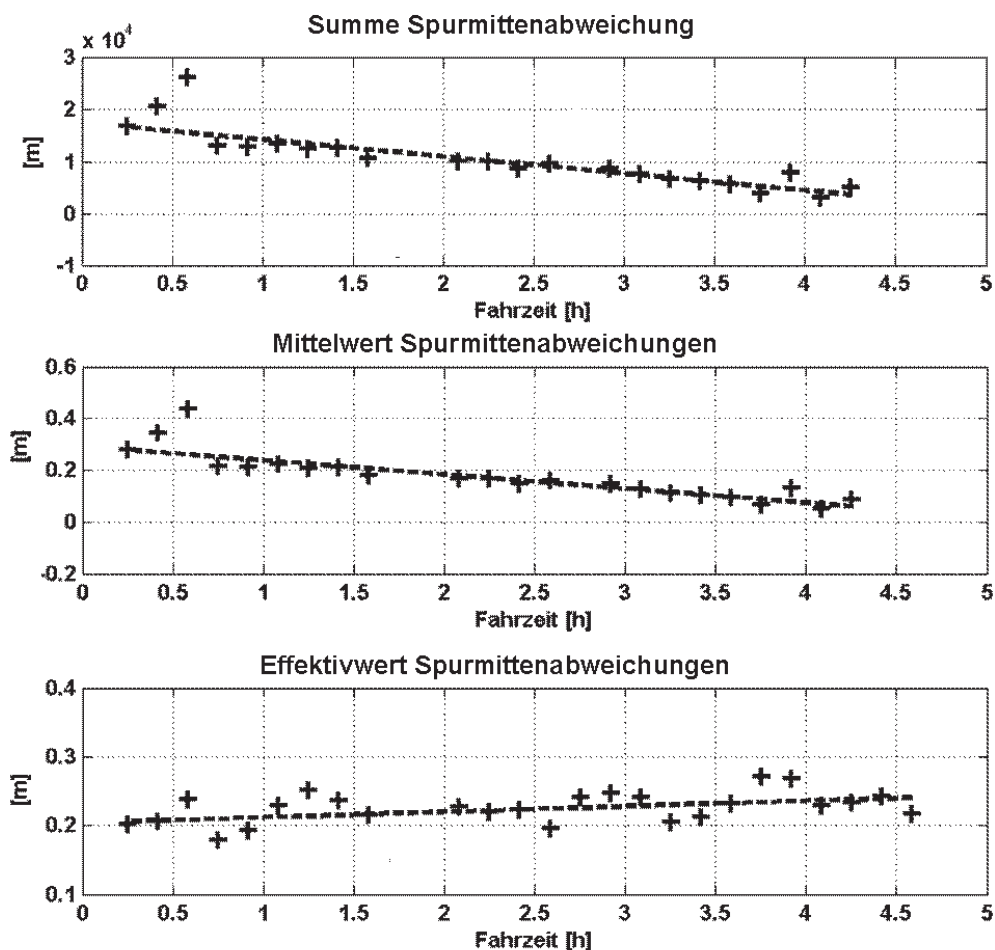


Abbildung 4: Summe, Mittelwert und Effektivwert der Spurmittenabweichung

Zusammen betrachtet lässt dies den Schluss zu, dass der Fahrer mit abnehmendem Leistungsvermögen effektiv höhere Abweichungen zur fahrerindividuellen Spurmitte fährt und stärker versucht das Fahrzeug entlang der Spurmitte zu führen.

Die Abbildung 5 gibt die Verläufe der Summe und der Extrema (Minima und Maxima) zwischen zwei Spurmittendurchgängen (Nullstellen der Spurmittenabweichung) und die zugehörige Periode wieder. Analog der oberen Abbildung sind die Kennparameter für die jeweiligen Zeitabschnitte über der Gesamtmessung dargestellt.

Die beiden Kennparameter der Extrema zeigen einen gegenläufigen Verlauf. Während die Summe der Extrema (oben) ansteigt, fällt der Mittelwert der Extrema (Mitte) ab. Zusammengenommen bedeutet dies für die leistungsabhängige Änderung des Fahrers, dass er im Mittel näher an der Spurmitte fährt jedoch die Summe der Extrema ansteigt, d.h. die Spurhaltefehler des Fahrers ansteigen.

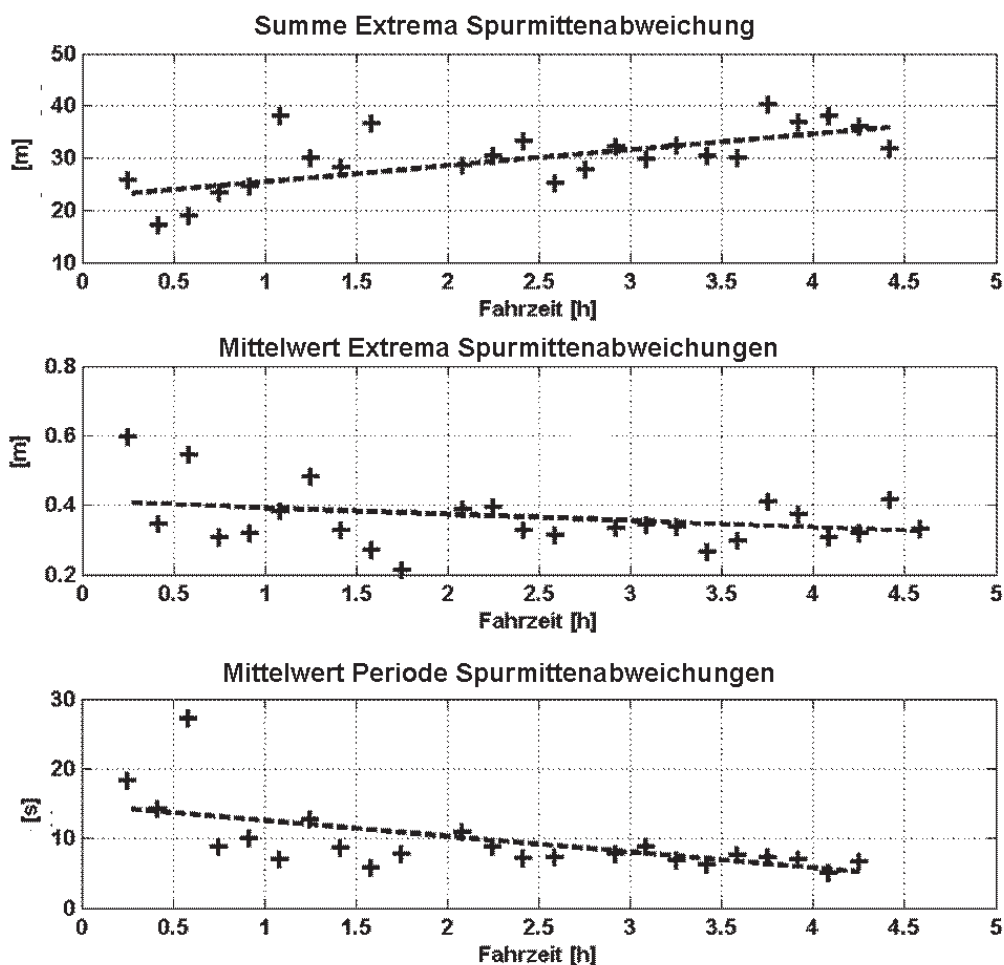


Abbildung 5: Summe und Mittelwert Extrema, Periode der Spurmittenabweichung

Der Mittelwert der Periode, also der mittlere Zeitabstand zwischen den Überfahrten der Spurmitte, fällt ebenfalls ab. Dies zusammengenommen verdeutlicht die Änderung des Spurhalteverhaltens des Fahrers. Mit zunehmender Fahrzeit steigt die Anzahl der Spurmittendurchfahrten, verdeutlicht an der sinkenden Periode und der steigenden Summe der Extrema. Der Mittelwert der Extrema verringert sich, was zeigt, dass der Fahrer verstärkt um die Mitte regelt.

Abschließend lassen sich anhand der dargestellten Kennparameter folgende Grundaussagen zusammenfassen:

- Mit abnehmendem subjektivem Leistungsvermögen ändert sich das Spurhalteverhalten des Fahrers.
- Diese Änderung lässt sich anhand der vorgestellten Kennparameter detektieren.
- Mit zunehmender Fahrzeit führt der Fahrer das Fahrzeug dichter an der Spurmitte.
- Die Zeitabstände zwischen den Spurmittendurchgängen werden kürzer.
- Der Effektivwert der Abweichung um die fahrerindividuelle Spurmitte steigt, der Fahrer verlässt vermehrt die von ihm gewählte Spurmitte.

Mit abnehmendem Leistungsvermögen verstärkt sich also die Tendenz des Fahrers seine individuelle Spurmitte zu verlassen und stärker um die tatsächliche Spurmitte zu regeln. Die Güte dieser Regelung gestaltet sich objektiv niedriger.

Die definierten Kennparameter zeigen in 65% bis 80% der betrachteten Versuchsfahrten einen Zusammenhang zum subjektiven Leistungsvermögen des Fahrers und weisen somit ein deutliches Potential zur Leistungsbeurteilung des Fahrers auf. Demgegenüber steht die Tatsache, dass die subjektive Einschätzung der Fahrer zur Abnahme des Leistungsvermögens bei 80%, und die der Beifahrer bei 100% liegt, d.h. nicht jeder Fahrer subjektiv, im Gegensatz zu den Versuchsleitern, eine Leistungsminderung wahrgenommen hat. Die Notwendigkeit der Verwendung mehrerer Kennparameter zur Fahrerbeurteilung basiert auf der unterschiedlichen Sensitivität der Fahrer auf den jeweiligen Kennparameter, als auch in der probandenspezifischen Höhe der Streuung.

3.2 Fahrerleistungsvermögen aus Fahrerübertragungsverhalten

Basis für eine regelungstechnische Beschreibung des Fahrerverhaltens bilden eine Vielzahl von Untersuchungen in Real- und Simulatorversuchen [2, 10]. Das für die Querregelung abgeleitete Fahrermodell (Abbildung 6) lässt sich strukturell darstellen durch einen Block der Informationsverarbeitung und eine Ebene regelungstheoretischer Elemente, die das Übertragungsverhalten zwischen der Fahrerinformation und der Lenkwinkelvorgabe zur Kurshaltungsaufgabe beschreiben.

Die regelungstheoretische Modellebene untergliedert sich weiter in einen Steuerungs- und einen kompensatorischen Anteil. Im Bereich der 'antizipatorischen Steuerung' stellt das Fahrermodell aufgrund der Straßenkrümmung κ_S einen Lenkradwinkel δ_{LS} ein. Mit den Elementen der 'kompensatorischen Regelung' wird ein zusätzlicher Lenkwinkel δ_{LR} infolge der Soll-Ist-Kurs-Abweichungen überlagert.

Bei den hier durchgeführten Untersuchungen zum Fahrerleistungsvermögen – und auch den meisten relevanten praktischen Fällen – bezieht sich die Fahraufgabe im Wesentlichen auf die Geradeausfahrt, z.B. auf Autobahnstrecken. In diesem Fall entfällt der Anteil der 'antizipatorischen Steuerung' und die Fahrerhandlung stellt ein reines Regeln um die Nulllage bzw. dem Folgen einer Sollspur parallel zur Fahrbahnmitte dar.

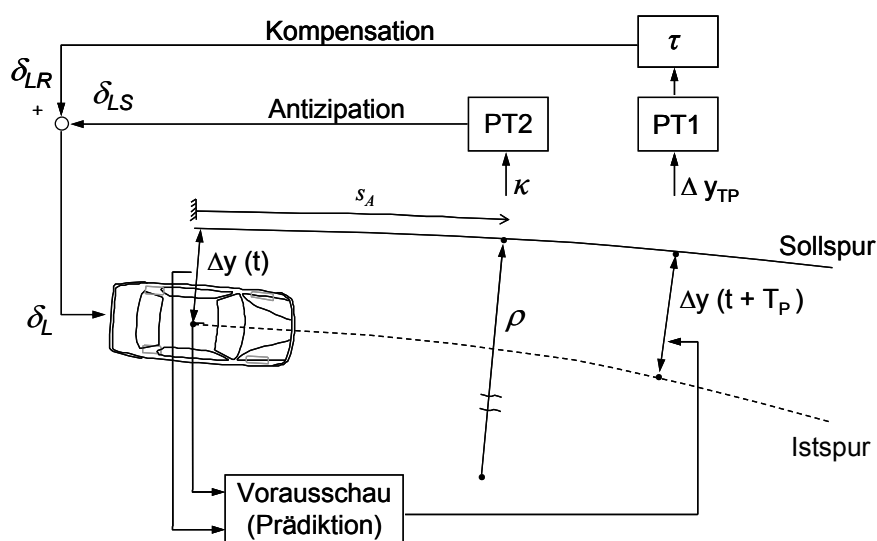


Abbildung 6: Struktur des Fahrermodells für die Querregelung

Die Übertragungsfunktion der 'antizipatorischen Steuerung' ergibt sich aus der Annahme, dass im Fall des 'Ideal-Fahrers' keine weitere Regelung zur Korrektur der gefahrenen Bahnkurve erforderlich ist. Es entspricht dann die Übertragungsfunktion H_{MS} für den Steuerungsprozess dem inversen Fahrzeugübertragungsverhalten. Unter Berücksichtigung linearisierter Fahrzeugeigenschaften folgt daraus für die Steuerung:

$$H_{MS}(s) = \frac{\delta_{LS}(s)}{\kappa_s(s)} = V_{MS} \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot T_A^2 \cdot s^2 + T_A \cdot s + 1}{T_{Z2}^2 \cdot s + T_{Z1} \cdot s + 1}$$

Die Übertragungsfunktion der 'kompensatorischen Regelung' H_{MR} zur Reaktion auf die Fahrspurabweichungen nimmt die Form

$$H_{MR}(s) = \frac{\delta_{LR}(s)}{\Delta y_{TP}(s)} = V_{MR} \cdot \frac{1}{T_{Z1} \cdot s + 1} \cdot e^{-s \cdot \tau}$$

an.

Darin steht der Fahrerparameter V_{MR} für die Verstärkung Lenkwinkel / Querabweichung, die Zeitkonstanten τ (Totzeit) und T_{Z1} (Verzögerungszeit) bilden die Verzögerungen durch die Informationsaufnahme und das neuromuskuläre System nach. Dass der Fahrer weitere vorhaltbildende Eigenschaften, d.h. ein vorausschauendes Verhalten, zur Regelung benutzt, berücksichtigt die zusätzliche Prädiktionsfunktion innerhalb der Informationsverarbeitung. Im Teilmodell der Prädiktion wird unter Berücksichtigung einer Vorausschauzeit T_P aus den Soll-Ist-Kursgrößen und dem aktuellen Fahrzeugzustand die geschätzte Querabweichung eines vorausliegenden Punktes berechnet, der den Kursfehler des Fahrzeugs in einem zukünftigen Zeitpunkt $t+T_P$ kennzeichnet. Aus Sicht des menschlichen Regelverhaltens sind die wesentlichen zur Kurshaltung einzustellenden Fahrerparameter die Verstärkung V_{MR} und die Vorausschauzeit T_P . Sie richten sich hauptsächlich nach der Anforderung der Regel-, bzw. Fahraufgabe.

Mit dem im Versuchsträger integrierten Fahrspurüberwachungssystem stehen mit den Regelgrößen Spurabweichung und Gierwinkelfehler sowie den Fahrzeugbewegungsgrößen aus den CAN-Signalen zusammen mit dem Lenkwinkel als Ausgangs-

größe alle erforderlichen Informationen zur Online-Identifikation des Fahrerverhaltens bei der Querregelung zur Verfügung.

Im Rahmen eines Identifikationsmodells werden die Fahrerparameter der Steuerung und der Regelung identifiziert. Die Eingangsgröße κ_S des Fahrersteuermodells wird direkt von dem Fahrspurüberwachungssystem zur Verfügung gestellt. Die Eingangsgröße des Fahrerregelungsmodells Δy_{TP} wird unter Berücksichtigung der Prädiktionszeit T_P aus der Spurlage und dem Gierwinkelfehler sowie der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit, -längsbeschleunigung, -querbeschleunigung und Gierrate berechnet. Mittels einer Fehlerminimierung zwischen dem Lenkwinkel des Fahrermodells δ_L , der Summe aus dem berechneten Lenkwinkel der Steuerung und der Regelung, und dem gemessenen Lenkwinkel δ_{LM} werden die Parameter der Übertragungsfunktion nach obigen Gleichungen sowie die Vorausschauzeit T_P aus der Prädiktion identifiziert. Analog der Vorgehensweise in Abschnitt 3.1 wird dabei die Gesamtfahrt in vorgegebene Zeitintervalle eingeteilt. Die betrachteten Regelparameter sind u.a. abhängig von der Fahrgeschwindigkeit (mit der sich die Fahrzeugübertragungseigenschaften ändern). Diese Abhängigkeit ist in der Identifikation berücksichtigt.

Für die Steuerung zeigt sich, dass sich die Fahrerverstärkung V_{MS} , die Antizipationszeit und die Vorausschauzeiten T_{Z2} und T_{Z1} mit zunehmender Fahrzeit und abnehmendem Leistungsvermögen ändern.

Für die Regelung verdeutlicht sich, dass die Fahrerverstärkung V_{MR} über der Fahrzeit zunimmt, während die Vorausschauzeit T_P abnimmt [3, 5]. Die Totzeit wird annähernd als Konstante identifiziert. Dies begründet sich darin, dass der Phasenverzug in der Fahrerreaktion implizit auch bereits durch eine Abnahme der Vorhaltbildung ausgedrückt wird.

Regelungstechnisch gesprochen bedeutet die Zunahme der Fahrerverstärkung und die Verringerung der Vorausschauzeit, dass absolut eine Erhöhung der Durchtrittsfrequenz (Betragsanhebung) und eine Absenkung der Phasenreserve (geringerer Vorhalt) im Regelkreis Fahrer-Fahrzeug eintritt. Mit zunehmender Fahrzeit regeln die Fahrer also stärker und dichter an der Stabilitätsgrenze des Regelkreises [3, 5].

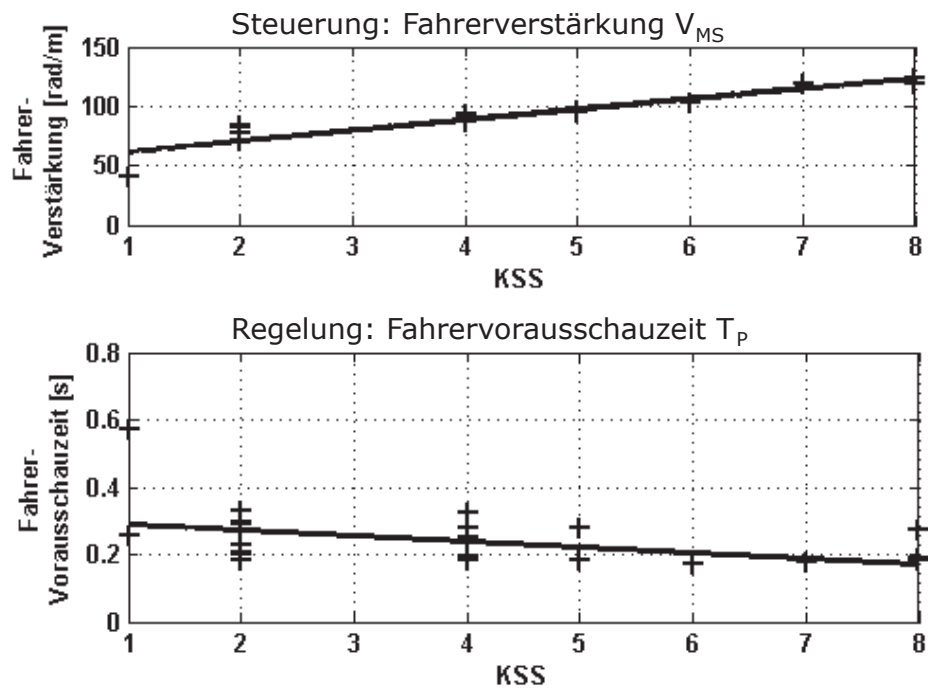


Abbildung 7: Regel- und Steuerparameter über subjektivem Leistungswert

Vergleicht man diese regelungstechnischen Eigenschaften mit den subjektiven Leistungswerten, stellt man eine Korrelation zwischen dem Fahrerleistungsvermögen und den am Fahrermodell beobachtbaren Veränderungen fest. In der Abbildung 7 ist dieser Zusammenhang beispielhaft für die aus der Steuerung identifizierte Fahrerverstärkung V_{MS} und die Fahrervorausschauzeit T_P der Regelung aufgeführt.

Dargestellt sind beispielhaft für eine Versuchsfahrt die identifizierten Kennparameter über dem subjektiven Leistungswert des Fahrers angelehnt an die Karolinska Sleepiness Scale [1]. Der Wert 9 steht für „extrem munter“, der Wert 2 für „schläfrig, etwas anstrengend wach zu bleiben“. Es verdeutlichen sich hier ein Anstieg der Fahrerverstärkung V_{MS} und ein Abfall der Fahrervorausschauzeit T_P bei zunehmender Müdigkeit.

4 Objektivierung des Fahrerleistungsvermögens

Neben der Analyse der Kennparameter hinsichtlich ihrer leistungsbedingten Änderung und der daraus resultierenden Änderung des Fahrverhaltens, ist es von Bedeutung, Modelle zu ermitteln mit deren Hilfe sich das Leistungsvermögen der Fahrer identifizieren lässt. Als Basis für diese Modellerstellung wird die Methodik der Korrelations- und Regressionsanalyse herangezogen. Im Rahmen der Korrelationsanalyse

sollen die (linearen) Zusammenhänge zwischen den ermittelten Kennparameter und den subjektiven Leistungswerten der Fahrer aufgezeigt werden. Die nachfolgende Regressionsanalyse liefert einen funktionalen Zusammenhang zwischen den Kennparameter x_i und einem objektivem Leistungswert Y der Form:

$$Y = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_n \cdot x_n .$$

Die Regressionsanalyse ermöglicht es, durch diese (lineare) Kombination unterschiedlich gewichteter Kennparameter den so genannten objektiven Leistungswert zu bestimmen, welcher ein Äquivalent zu den subjektiven Urteilen darstellt.

Mittels einer umfangreichen Korrelations- und Regressionsanalyse wird zunächst der Zusammenhang zwischen den ermittelten Kennparametern und dem subjektiven Leistungswerten jedes Probanden untersucht. Es werden hierzu zum einen die Korrelationen der Kennparameter zu den subjektiven Urteilen für jeden einzelnen Probanden ermittelt und zum anderen werden für jede Versuchsfahrt mittels der Regressionsanalyse kennparameterbasierte Modelle ermittelt, welche es ermöglichen, einen objektiven Leistungswert analog zu Skalierung der subjektiven Leistungswerte zu berechnen.

Im nächsten Schritt werden die Kennparameter der einzelnen Probandenversuche in geeigneter Form zusammengefasst und eine Korrelations- und Regressionsanalyse analog der Einzelanalysen durchgeführt. Ergebnis sind kennparameterbasierte Modelle, die eine Identifikation des Fahrerleistungsvermögens ermöglichen.

In der Abbildung 8 sind beispielhaft die Ergebnisse eines Identifikationsmodells basierend auf einem Kennparameter wiedergegeben. Dargestellt ist auf der linken Seite der subjektive Leistungswert angelehnt an die Karolinska Sleepiness Scale KSS (Tabelle 2) über dem normierten Kennparameter. Zusätzlich ist der Korrelationskoeffizient angegeben. Auf der rechten Seite ist der aus dem Regressionsmodell berechnete objektive Leistungswert über dem subjektiven KSS-Wert dargestellt.

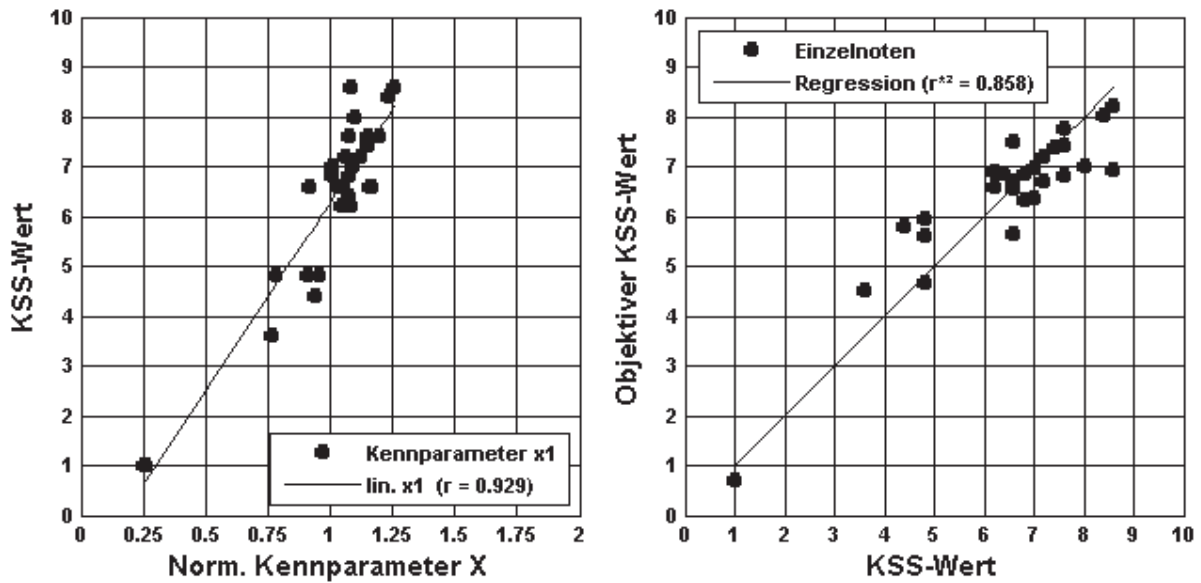


Abbildung 8: Ergebnisse Regressionsmodell I

Der gezeigte Kennparameter korreliert mit einem Korrelationskoeffizienten $r = 0.929$ mit dem subjektiven Leistungswert. Das identifizierte Regressionsmodell weist ein korrigiertes Bestimmtheitsmaß $r^2 = 0.858$ auf. Um im Weiteren ein höheres Bestimmtheitsmaß und damit eine höhere Qualität in der Identifikation des objektiven Leistungswerts zu erreichen, werden weitere Kennparameter zur Modellbildung mit herangezogen.

In der folgenden Abbildung 9 sind beispielhaft die Ergebnisse eines Regressionsmodells basierend auf 5 Kennparametern dargestellt.

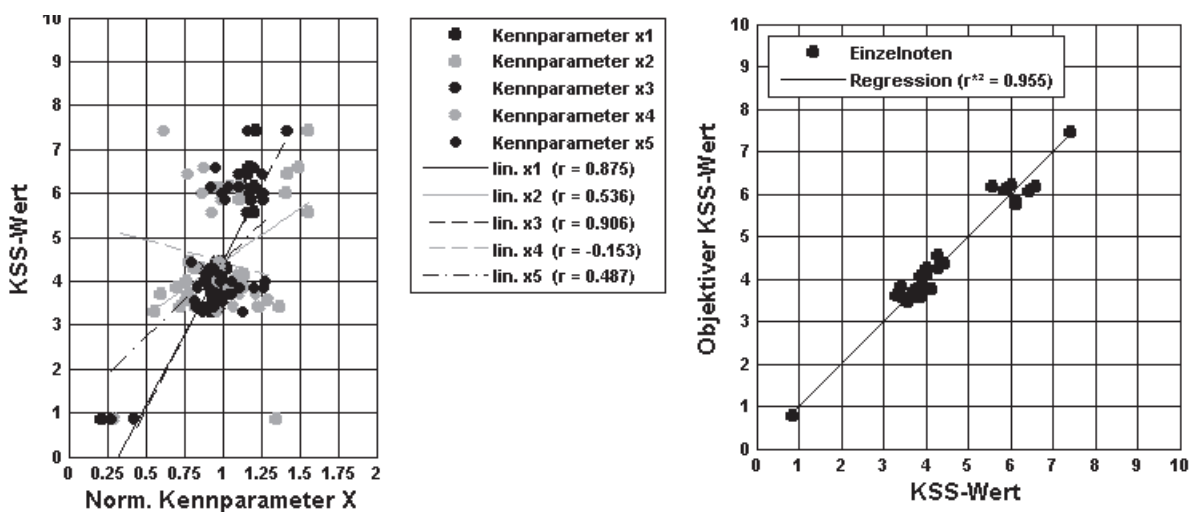


Abbildung 9: Ergebnisse Regressionsmodell II

Die verwendeten Kennparameter stellen eine Kombination der unter 3.1 und 3.2 definierten Kriterien aus dem Spurhalteverhalten und dem Fahrermodell dar. Analog zur vorherigen Abbildung ist links der subjektive Leistungswert über den jeweiligen normierten Kennparameter aufgetragen und der zugehörige Korrelationskoeffizient angegeben. Rechtsseitig ist der identifizierte objektive Leistungswert über dem subjektiven Leistungswert wiedergegeben. Das erweiterte Regressionsmodell weist ein bereinigtes Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0.955$ auf, womit eine sehr hohe Berechnungsgüte erreicht wird. Es verdeutlicht sich in der Darstellung der objektiven Leistungswerte zu den subjektiven Leistungswerten, dass die Objektivierung des Fahrerleistungsvermögens anhand der identifizierten Kennparameter mit einer hohen Aussagegüte möglich ist.

Ausblick

Die gezeigten Methoden zur Identifikation des Fahrerleistungsvermögens bergen ein deutliches Potential, den Fahrer ganzheitlich zu beschreiben. Insbesondere das Spurhalteverhalten des Fahrers gibt einen Aufschluss auf seine Fähigkeit, das Fahrzeug sicher und unfallfrei zu bewegen. Die Abnahme des Leistungsvermögens von Fahrern lässt sich mit den definierten Kennparametern in Zusammenhang bringen und diese können somit als aussagekräftige Objektivierungsgrößen herangezogen werden.

Neben der Methode über die reine Sensierung und Auswertung der Spurhaltung eröffnen sich, wie im letzten Abschnitt für ein Querregelkreismodell gezeigt wurde, neue Potentiale, das Leistungsvermögen anhand der Übertragungseigenschaften des Fahrers zu ermitteln. Zielführend zeigt sich dabei nach den aktuellen Ergebnissen die Identifikation der Kennparameter für die Fahrer-Verstärkungen und Vorausschauzeiten sowie die Beobachtung ihrer zeitlichen Veränderungen.

Beide Ansätze zusammengenommen zeigen eine entsprechende Änderung des Fahrerhaltens mit abnehmendem Leistungsvermögen. Zum einen verdeutlicht die Änderung des Spurhalteverhaltens des Fahrers, dass sich seine individuelle Spurmitte zur Spurmitte hin verschiebt und er effektiv höhere Spurabweichungen fährt. Zum anderen zeigen die Kennparameter des Fahrermodells der Regelung eine Abnahme der Vorausschauzeit und eine Zunahme der Fahrerverstärkung, was gleichbedeu-

tend mit einer Verschiebung in Richtung Stabilitätsgrenze des Regelkreises ist. Der Fahrer führt das Fahrzeug objektiv gesehen schlechter.

Die durchgeführte Korrelations- und Regressionsanalyse ermöglicht es, Berechnungsmodelle zu erstellen, welche ein hohes Potential zur Identifikation eines objektiven Leistungswerts aus dem spezifischen Fahrverhalten des Fahrers aufweisen. Vergleichend mit subjektiven Urteilen wird eine Aussagegüte der Modelle von bis zu 96% erreicht.

Zusätzlich zur Beurteilung des Fahrers ist es sinnvoll die Leistungskennntnis mit situativ angepasster Assistenz zu verknüpfen und einen integrierten Ansatz umzusetzen. Am Institut für Fahrzeugtechnik befinden sich zu einem integrierten Ansatz zur Querführungsassistenz derzeit drei weitere Versuchsreihen in Planung. Zum einen wird die Wirkung von längs- und querdynamischen Assistenzsystemen mit unterschiedlich hohem Assistenzgrad auf die Leistungsfähigkeit des Fahrers und auch auf die Identifikationsgrößen untersucht, zum anderen wird ein Vergleich mit den direkten Methoden erfolgen. Hierzu wird die Sensorik des Versuchsfahrzeugs um ein System zur Müdigkeitsüberwachung erweitert, und die Müdigkeitswerte werden dann mit den subjektiven Befragungswerten des Fahrers verglichen sowie den objektiven Leistungsdaten aus den hier dargestellten Methoden gegenübergestellt.

Literatur

- [1] Åkerstedt, T, Gilberg, M., *Subjective and objective sleepiness in the actived individual*, International Journal Neuroscience, 1990, 52: 29-37
- [2] Apel, A.: *Modellierung des Fahrerverhaltens bei der Längs- und Querführung von Pkw*. Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, Dissertation, 1997
- [3] Bergholz, J., Henze, R., Küçükay, F., *Identifikation des Fahrerleistungsvermögens*, AAET 2008, Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, 9. Braunschweiger Symposium, 13.-14.02.2008, Braunschweig

- [4] Bergholz, J., Henze, R., Küçükay, F., *Beurteilung und Assistenz des Fahrers bei der Fahrzeugquerführung*, 12. IfF-Tagung, 07.-09. März 2007, Braunschweig
- [5] Bergholz, J., Henze, R., Küçükay, F., *Indirekte Methoden zur Identifikation des Fahrerleistungsvermögens*, Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme, 12.-13. Oktober 2006, Wolfsburg, VDI-Bericht Nr. 1960
- [6] Bisimis, E.: *Testverfahren für das instationäre Lenkverhalten*. In: Entwicklungsstand der objektiven Testverfahren für das Fahrverhalten. Köln: Verlag TÜV Rheinland, Kolloquiumsreihe 'Aktive Sicherheit' (1978), S. 117 - 140
- [7] Küçükay, F., Henze, R., Bergholz, J., *Bewertung des Fahrerleistungsvermögens und der -aufmerksamkeit*, AAET 2006, Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, 7. Braunschweiger Symposium, 22.-23.02.2006, Braunschweig
- [8] Küçükay, F., Haney, D., *Driver Assistance Systems and Attentioness Control*, FISITA World Automotive Congress 2004, Barcelona
- [9] Haus der Technik e.v., *Müdigkeit im Verkehr: Ursachen, Erkennung und Gegenmaßnahmen*, 20.-21. Juni 2001, Essen
- [10] Henze, R., *Beurteilung von Fahrzeugen mit Hilfe eines Fahrermodells*, Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik Nr. 7, Dissertation TU Braunschweig, 2004
- [11] Gödecke, A., Haney, D., *Fahrerassistenzsysteme zur Aufmerksamkeitskontrolle*, 10. IfF-Tagung, 26.-28.03.2003, Braunschweig
- [12] Küçükay, F., Haney, D., *Fahrerleistungsvermögen*, Bericht Nr. 050 des Instituts für Fahrzeugtechnik, Braunschweig, 2003
- [13] Rose, A., *Unterschiede physiologischer Indikatoren des Fahrerszustandes zwischen Real- und Simulatorfahrt*, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12 Nr. 625, Dissertation, 2006
- [14] Statistisches Bundesamt, *Unfallgeschehen im Straßenverkehr 2006*, Wiesbaden, 2007