

# Fahrzeugtrajektorie und Trasse als Ergebnisse kinematischer Vermessung

Harald Sternberg und Wilhelm Caspary

## Zusammenfassung

Mit Hilfe von Multisensorsystemen, die auf inertialer Messtechnik, DGPS und anderen Sensoren basieren, kann die Bewegung eines Fahrzeuges entlang eines Verkehrsweges erfasst und in einem Kalman-Filter berechnet werden. Die Darstellung dieser Bewegung erfolgt meist als dreidimensionale Punktfolge, aus der die Verkehrswegeachse und auch die Trassierungselemente des Verkehrsweges berechnet werden können.

## Summary

*The movement of a vehicle along a traffic route can be measured by multi-sensor systems, which are based on inertial measuring techniques, DGPS and other sensors. The movement can be determined in a Kalman filter. The result is a chain of three-dimensional points. The alignment of the traffic route and also the setting-out elements like straight lines, transition curves and circular curves can be calculated from this sequence of coordinate triplets.*

## 1 Trajektorie

Die kontinuierliche Bewegung eines Fahrzeuges lässt sich meist nur in diskreten Punkten beschreiben, da für eine

analytische Beschreibung die Information über die Dynamik fehlt. Für die Bewegung kann daher nur ein kinematisches Modell formuliert werden, das die Fahrzeugtrajektorie mit Hilfe von Position, Geschwindigkeit und Ausrichtung des Messsystems zu jedem Zeitpunkt darstellt. In der Praxis wird der Verlauf der Trajektorie als dreidimensionale, orientierte Punktfolge im Raum beschrieben. Die Trajektorie wird u. a. zur Ableitung der Verkehrswegeachse und zur Orientierung von Objekterfassungssystemen, wie CCD-Sensoren, Videokameras und Laserscannern verwendet.

## 2 Sensoren auf dem Fahrzeug

Für die Berechnung der Trajektorie benötigt man Sensoren, die alle Messwerte erfassen, die erforderlich sind, um die sechs Freiheitsgrade der Lage des Fahrzeuges im Raum kontinuierlich bestimmen zu können. Stationäre Systeme, die das Fahrzeug von außen einmessen, wie Lasertracker oder Tachymeter mit automatischer Zielverfolgung erlauben nur einen sehr eingeschränkter Bewegungsradius des Fahrzeuges, so dass sie für die Erfassung von Verkehrswegen ausscheiden. Üblicherweise werden daher diese Sensoren mit dem Fahrzeug mitgeführt. Die

rohen Sensordaten werden getrennt voneinander erfasst und für die später erfolgende Auswertung abgespeichert, wie in Abb. 1 skizziert.

Hauptsensor für die Trajektorienbestimmung ist meist ein inertiales Navigationssystem (INS), das fast immer in strapdown Mechanisierung relative Positions- und Winkeländerungen liefert, die in der Navigationsberechnung zu Positionen und Lagewinkeln mit hoher Abtastrate verrechnet werden. Das autonome Messsystem muss jedoch von außen gestützt werden, d. h. dem Navigationssystem müssen von außen Beobachtungen wie Positionen oder Geschwindigkeiten zugeführt werden, da bereits kleine Sensorfehler nach kurzer Zeit zu großen Positionsfehlern führen (Schwarz, 1996).

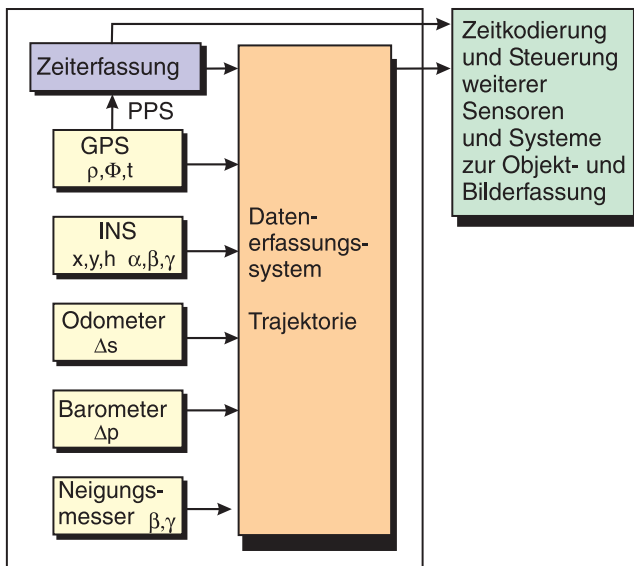


Abb. 1: Sensoren und Signale zur Trajektorienbestimmung

Das *Global Positioning System* (GPS) ist der wichtigste Stützsensoren. Die Bestimmung der Positionen mit dem GPS erfolgt differentiell. Dazu wird ein zweiter GPS-Receiver eingesetzt oder der SAPOS-Dienst genutzt. Mit einer Erfassungsrate zwischen 1 Hz und 20 Hz werden die Rohdaten gespeichert. Sie liefern neben den aus

Codemessungen und aus Phasenbeobachtungen abgeleiteten Pseudoentfernungen die Dopplerverschiebung der Signale.

Aufgrund der Einschränkungen in der Verfügbarkeit des GPS kommen als zusätzliche Sensoren zur Stützung der inertialen Komponente Geschwindigkeitssensoren, digitale Barometer und/oder Neigungssensoren zum Einsatz. Die genaue Synchronisation der Sensoren erfolgt durch das Zeitsignal (PPS), das die GPS-Satelliten aussenden.

### 3 Kaskadenförmiges Filtersystem

Während der Messfahrt werden die Sensordaten nur im Rohdatenformat mit einer Zeitmarke aufgezeichnet (Heister et al. 2002a). Sämtliche Korrekturen werden erst in der Nachbearbeitung an den Daten angebracht. Diese erfolgt üblicherweise erst nach der Messfahrt. Dies erlaubt den Einsatz optimaler Schätzmethoden und rechenintensiver Algorithmen. Dabei können eventuelle Beobachtungsfehler detektiert und eliminiert werden. Alle Zwischen- und Endergebnisse werden gefiltert und anschließend geglättet.

Bei dezentralen Filtersystemen hat jeder Sensor sein eigenes Subfilter, dessen Ergebnisse in einem Hauptfilter weiterverarbeitet werden. Die einfachste Form der Integration von GPS und INS liegt vor, wenn beide als autonome Systeme eigenständige Navigationslösungen rechnen, die auf der Ebene der Positionen miteinander kombiniert werden. Da bei dieser Form keine Rückkopplung auf die beiden Subsysteme stattfindet, spricht man von einem offenen Regelkreis (*open loop*). Im kaskadierenden Filtersystem erfolgt die Aufdatierung des geschätzten Zustandsvektors  $\hat{x}_g$  des GPS-Filters und der Zustandsvektoren der anderen Subfilter, wie in Abb. 2 schematisch dargestellt.

Im Gegensatz dazu werden bei zentralen Filtern alle rohen Sensordaten in einem einzigen Filter verarbeitet. Eine Vorfilterung findet nicht statt.

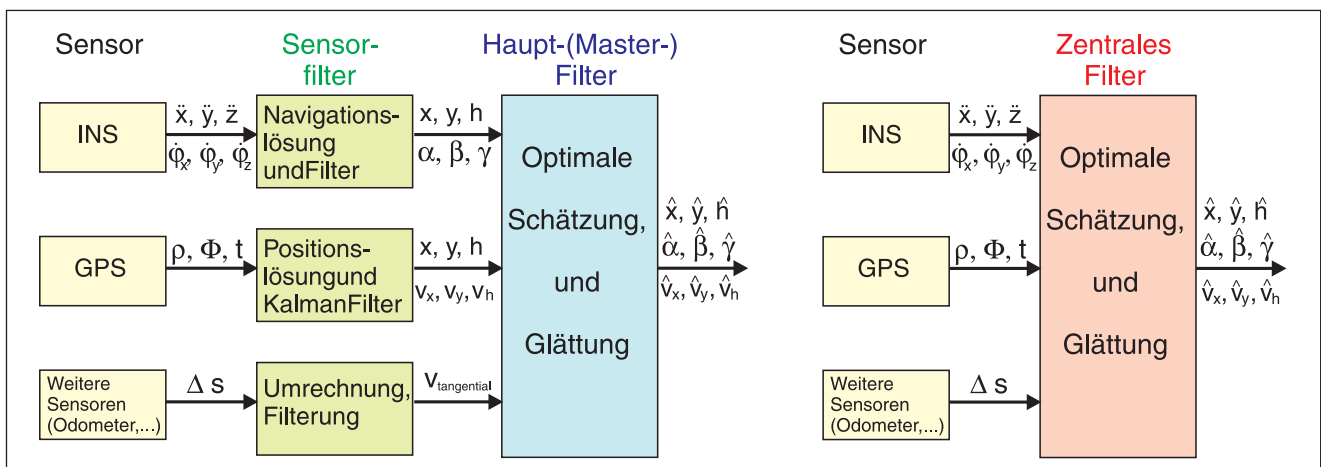


Abb. 2: Dezentrales Filtersystem und zentrales Filter

Bei einem Vergleich der beiden Filtermodelle fällt zuerst der Vorteil des zentralen Filters auf, das auch Informationen des GPS bei weniger als vier empfangenen Satelliten nutzen kann, da als Beobachtung die Pseudoentfernungen und Streckenänderungen und nicht die berechneten Positionen und Geschwindigkeiten genutzt werden. Dies erfordert jedoch komplexere Mess- und Filtergleichungen.

Insgesamt bieten die dezentralen Systeme folgende entscheidenden Vorteile, für die eine geringe Verschlechterung der Schätzgenauigkeit hingenommen werden muss:

- einfache Beobachtungs- und Filtermodelle
- deutlich weniger Zustandsgrößen in den Subfiltern als im zentralen Filter
- geringerer Rechenaufwand
- leichtere Überwachung der Datenintegrität
- modulares Sensorkonzept möglich, da die Sensoren lose miteinander verbunden sind.

#### 4 Filter für einzelne Sensoren

Für die Auswertung der Messdaten des kinematischen Vermessungssystems KiSS, wie es am Institut für Geodäsie der Universität der Bundeswehr entwickelt wurde, standen gerade das modulare Konzept und die leichte Überwachung der Datenintegrität an vorderer Stelle, so dass ein dezentrales Filter implementiert wurde (Sternberg, 2000).

Die Auswertung aller Sensordaten erfolgt hier mit einem Vorverarbeitungsschritt und in einem kaskadenartigen, dezentralen Filtersystem mit vier unabhängigen Vor- und einem Hauptfilter, dessen Aufbau in Abb. 3 zusammen mit den Sensoren, den Messsignalen und den Pseudobeobachtungen skizziert ist.

In der Vorverarbeitung werden die rohen Messwerte in Pseudobeobachtungen umgerechnet und korrigiert. So

werden z.B. aus den Luftdruckunterschieden des Barometers Höhenänderungen berechnet. In diesem Berechnungsschritt werden die Pseudobeobachtungen außerdem in das übergeordnete Referenzsystem des Fahrzeugs mit dem Nullpunkt im INS transformiert.

In der nächsten Verarbeitungsstufe werden die Pseudobeobachtungen in individuellen Sensorfiltern gefiltert und geglättet. Dadurch erhält man eine gute Kontrolle über die Sensorsignale bzw. die Pseudobeobachtungen. Die Filtermodelle für die Weggeber und das Barometer sind recht einfach, da es nur auf eine Glättung der Daten und die Elimination von Ausreißern ankommt. Für die GPS-Signale wurde dagegen ein eigenständiges Kalman-Filter entwickelt. Dieses verarbeitet als Beobachtungen doppelt differenzierte Pseudoentfernungen, die aus Code-Messungen gewonnen werden, und dreifach differenzierte Trägerphasenmessungen (Phasenraten). Als Ergebnis erhält man stark geglättete relative Positionen und Geschwindigkeiten. Eine Sonderstellung nimmt das INS ein, das aus Sensoreinheit und Navigationsrechner besteht. Das firmenseitig implementierte Kalman-Filter, auf das der Nutzer nicht zugreifen kann, wird durch Nullgeschwindigkeiten und Weggebersignale gestützt. Es liefert gefilterte Positionen und Lagewinkel. Während die Positionen für die weitere Verwendung nicht geeignet sind, da sie mit zu geringer Auflösung ausgegeben werden, sind die Lagewinkel von hervorragender Qualität und ganz entscheidend für die Genauigkeit des Gesamtsystems.

Vor der gemeinsamen Weiterverarbeitung im Haupt-Kalman-Filter sind Interpolationen erforderlich, da das Filter gleichabständige Beobachtungen, die im gleichen Zeitraster liegen, erfordert. Insbesondere müssen die Lagewinkel und die Geschwindigkeiten für den gleichen Zeitpunkt zur Verfügung stehen, da sie die Grundinformation für die Koppelnavigation liefern. Neben den ge-

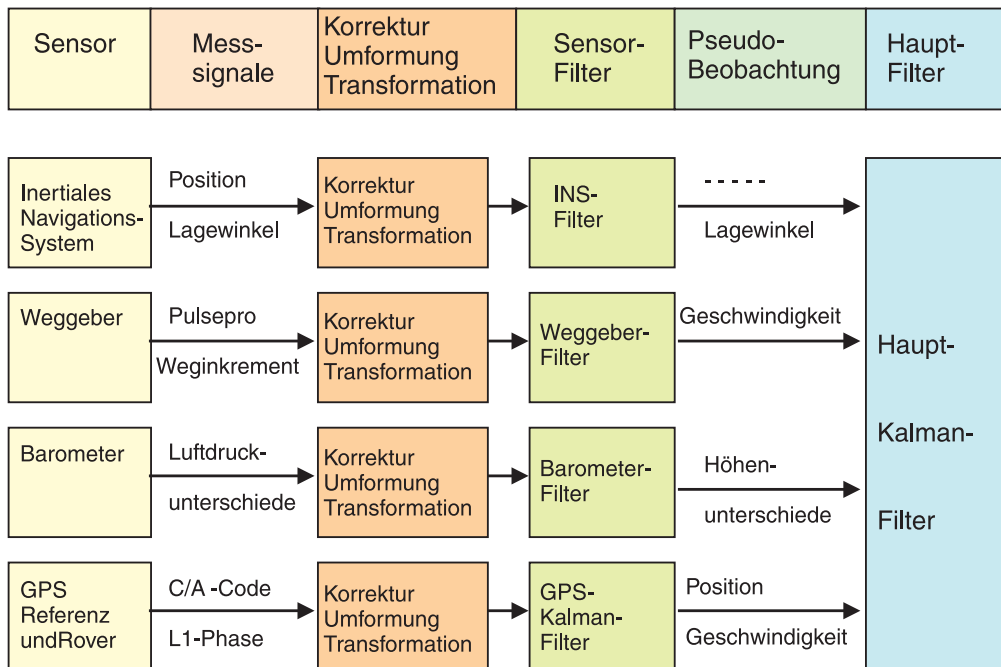


Abb. 3: Kaskadierendes Filtersystem mit unabhängigen Vorfiltern und Haupt-Kalman-Filter (Sternberg et al. 1998)

glätteten Pseudobeobachtungen stehen Kovarianzmatrizen aus den Vorverarbeitungsschritten für die Gewichtung der Beobachtungen zur Verfügung.

## 5 Signalfusion in einem Hauptfilter

Die vorverarbeiteten Messdaten können als Beobachtungen mit ihren Kovarianzmatrizen in einem Haupt-Kalman-Filter miteinander kombiniert werden. Allgemein können die Schätzgleichungen des Kalman-Filters in drei Abschnitte eingeteilt werden: die Prädiktion, die Berechnung der Innovation und die Korrektur der Prädiktion, wie in Caspary/Wang (1998) beschrieben.

Den ersten Schritt stellt die *Prädiktion* des Zustandes und seiner Kovarianzmatrix von Epoche  $k-1$  zu Epoche  $k$  dar.

$$\begin{aligned}\bar{x}_{k/k-1} &= T_k \cdot \hat{x}_{k-1} + B_k \cdot w_{k-1} \\ D_{\bar{x},k/k-1} &= T_k \cdot D_{\hat{x},k-1} \cdot T_k^t + B_k \cdot Q_{k-1} \cdot B_k^t\end{aligned}\quad (1)$$

Die Beobachtungsgleichung lautet:

$$z_k = A_k \cdot x_k + \epsilon_k \quad (2)$$

Mit dem vorläufigen Zustand  $\bar{x}_{k/k-1}$  werden die Beobachtungen präzisiert und von den tatsächlichen Werten  $z_k$  subtrahiert. Das Ergebnis sind die Prädiktionsresiduen (*Innovation*)  $d_k$  deren Kovarianzmatrix ebenfalls geschätzt wird.

$$\begin{aligned}d_k &= z_k - A_k \cdot \bar{x}_{k,k-1} \\ D_{d,k} &= A_k \cdot D_{\bar{x},k/k-1} \cdot A_k^t + R_k\end{aligned}\quad (3)$$

Eine *Korrektur der Prädiktion* wird dann aus der Innovation und der Verstärkungsmatrix  $K$ , zusammen mit der Kovarianzmatrix berechnet:

$$\begin{aligned}\hat{x} &= \bar{x}_{k,k-1} + K_k \cdot d_k \\ D_{\hat{x},k} &= D_{\bar{x},k/k-1} - K_k \cdot A_k \cdot D_{\bar{x},k/k-1} \\ K_k &= D_{\bar{x},k/k-1} \cdot A_k^t \cdot D_{d,k}^{-1}\end{aligned}\quad (4)$$

mit

- x Zustandsvektor
- z Beobachtungsvektor
- T Übergangs-(Transitions)matrix
- A Beobachtungsmatrix
- B Störeingangsmatrix
- $\epsilon$  Beobachtungsrauschvektor (stochastisch)
- w Systemrauschvektor (stochastisch)
- d Innovation bzw. Prädiktionsresiduen
- D Kovarianzmatrix des Zustandes
- R Kovarianzmatrix des Beobachtungsrauschens
- Q Kovarianzmatrix des Systemrauschvektors w
- K Verstärkungs-(Gain-)matrix

Für die Aufstellung der Matrizen und die Festlegung der Elemente der Vektoren sind die Modellierung der Bewegung im Raum und die Beobachtbarkeit der Zustände wichtige Kriterien.

Die Beobachtungen, die im System KiSS in einem dezentralen Ansatz im Hauptfilter kombiniert werden, sind:

x, y, z	dreidimensionale Position aus phasengeglätteten Codelösungen
$v_x, v_y, v_z$	dreidimensionale Geschwindigkeit aus den GPS-Berechnungen
$\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$	drei Lagewinkel aus dem Inertialen Navigationssystem
v	Geschwindigkeit in Fahrtrichtung aus dem Weggeber
h	Höheninformation aus dem Barometer

Nach der Synchronisation der Beobachtungen stehen die GPS-Daten mit 5 Hz, die Drehwinkel und die Geschwindigkeit in Fahrtrichtung mit 50 Hz und die barometrischen Höhen mit 1 Hz zur Verfügung.

Im Zustandsvektor  $x$  werden nicht die Fehler der Positionen und der Sensoren geschätzt, sondern die Position und der Richtungswinkel selbst:

x, y, z	dreidimensionale Position
$\varphi_z$	Richtungswinkel des Fahrzeugsystems
$v_{\text{tang}}$	Geschwindigkeit in Fahrtrichtung
$a_{\text{zentri}}$	Zentripetalbeschleunigung

Im Systemrauschvektor werden die Tangentialbeschleunigung  $a_{\text{tang}}$  in Fahrtrichtung und der Normaldruck  $j_n$  senkrecht zur Fahrtrichtung berücksichtigt.

## 6 Optimale Glättung

Da das Kalman-Filter ein rekursives Filter ist, gehen in die Berechnung der Zustandsgrößen nur die Informationen der zurückliegenden Epochen ein, was insbesondere bei einem Ausfall der GPS-Daten zu einer Steigerung der Standardabweichung und zu einer Verfälschung der Position führen kann. Durch eine Rückwärtsfilterung der Daten und eine anschließende gewichtete Linearkombination der Ergebnisse des Vorwärts- und des Rückwärtsfilters lässt sich eine optimale Glättung des Zustandsvektors  $x_k$  bilden. Der Algorithmus ist davon abhängig, in welcher Form die Zustandsvektoren vorliegen, d.h. ob die Zustände präzisiert oder schon geschätzt wurden.

Bei dem Rückwärtsfilter werden vom Zustand zur Epoche  $t_N$  ausgehend die Rekursionsschritte rückwärts durchlaufen, d. h. die Beobachtungsreihe lautet:

$$z_N, z_{N-1}, \dots, z_2, z_1.$$

Es seien  $\hat{x}_{k,r}$  und  $\bar{x}_{k/k+1,r}$  die geschätzten Zustandsvektoren aus dem Vorwärtsfilter und dem Rückwärtsfilter für die Epoche  $k$ . Der Zustandsvektor aus dem Vorwärtsfilter

$\hat{x}_{k,v}$  wird mit seiner Varianzmatrix  $D_{k,v}$  ermittelt und ist von den Beobachtungen  $z_1, z_2, \dots, z_k$  abhängig. Der prädiizierte Zustandsvektor der Epoche  $k$  aus dem Rückwärtsfilter  $\bar{x}_{k/k+1,r}$  wird berechnet aus:

$$\bar{x}_{k/k+1,r} = T \cdot \hat{x}_{k+1,r}, \quad D_{k/k+1,r} = TD_{k+1,r}T^T + BQ_{k+1}B^T \quad (5)$$

$\bar{x}_{k/k+1,r}$  ist nur von den Beobachtungen  $z_N, z_{N-1}, \dots, z_{k+1}$  abhängig.  $\hat{x}_{k,v}$  und  $\bar{x}_{k/k+1,r}$  sind daher nicht korreliert. Die optimale Glättung des Zustandsvektors  $x_k$  erfolgt dann durch Bildung des gewogenen Mittels:

$$\hat{x}_{k,g} = (D_{k,v}^{-1} + D_{k/k+1,r}^{-1})^{-1}(D_{k,v}^{-1} \cdot \hat{x}_{k,v} + D_{k/k+1,r}^{-1} \cdot \bar{x}_{k/k+1,r}) \quad (6)$$

$$D_{k,g} = (D_{k,v}^{-1} + D_{k/k+1,r}^{-1})^{-1} \quad (7)$$

Geht man jedoch von den geschätzten Zustandsvektoren  $\hat{x}_{k,v}$  und  $\hat{x}_{k,r}$  aus, so sind diese miteinander korreliert, da beide die Beobachtung  $z_k$  enthalten. Die Korrelation kann ausgedrückt werden durch:

$$D_{k,vr} = D_{k,v} \cdot A_k^T \cdot R_k^{-1} \cdot A_k \cdot D_{k,r} \quad (8)$$

Die Glättung des Zustandvektors kann ebenfalls durch die Gleichungen (6) und (7) erfolgen, die nun allerdings approximativ sind.

Beide Glättungsverfahren basieren auf einem Frase-Mayne-Algorithmus, wie er u.a. in Gelb (1974) beschrieben ist. Das Ergebnis ist die geglättete Folge der Positionen des Fahrzeugnullpunktes und der dazugehörigen Lagewinkel mit hoher Frequenz, die sogenannte Trajektorie. Diese ist aber nicht identisch mit der Verkehrswegeachse.

## 7 Überbrücken von GPS-Ausfällen

Da GPS als wichtigster Stützsensordie konstante, absolute Punktgenauigkeit vorgibt, hängt bei GPS-Ausfällen die Genauigkeit von der Güte der Koppelnavigation ab. Diese erfolgt bei Inertialsystemen in der Regel im Navigationsalgorithmus des INS, kann aber auch mit den Daten von Kreisel und Weggeber durchgeführt werden. In Abhängigkeit von den verwendeten Sensoren und von der Qualität der im Filter geschätzten Sensorfehler können GPS-Ausfälle von wenigen Sekunden bis zu einigen Minuten ohne signifikante Verschlechterung der Positionsschätzung überbrückt werden.

Für die Überprüfung des Haupt-Kalman-Filters wurde bei der Auswertung einer Testfahrt, die unter optimalen Satellitenempfangsbedingungen stattfand, eine völlige Satellitenabschattung für 60 Sekunden simuliert und die dabei geschätzten Positionen mit der Phasenlösung aus den GPS-Daten verglichen. Die Standardabweichung der kinematischen Positionen aus der Phasenlösung liegt unter 3 cm. In Abb. 4 sind die Differenzen der Ergebnisse des Vorwärtsfilters, des Rückwärtsfilters und der Glättung zur GPS-Solltrajektorie veranschaulicht. Bei der Interpretation ist zu beachten, dass die Filterlösungen GPS-Code-messungen verarbeiten.

Die Abweichungen der geglätteten Ostwerte bleiben unter 0,4 m auf einer Strecke von 1200 m was einem Skalenfaktorfehler von 0,03 % entspricht. Die Abweichungen der Nordwerte, kann man aufgrund der Anlage der Testfahrt als Kreisel drift mit  $\sim 0,08 \text{ }^\circ/\text{h}$  interpretieren. Beide Werte liegen in der Größenordnung, die man von dem System erwarten kann. Die Höhenabweichung liegt in dem Genauigkeitsbereich, der mit der Standardabweichung der barometrischen Höhenbestimmung korrespon-

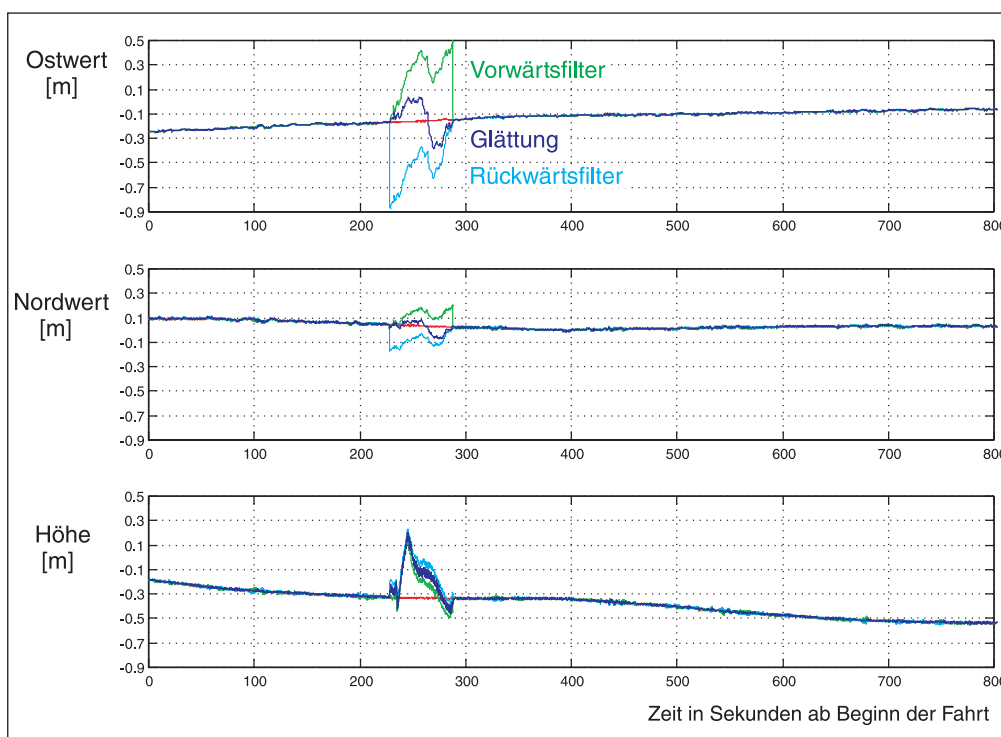


Abb. 4: Abweichung zwischen OTF Positionierung (ohne Ausfall) und der Trajektorie des Hauptfilters bei einem GPS-Ausfall von 60 Sekunden

diert. Diese Interpretation ist hier jedoch nicht vollständig, da die Abweichungen noch von weiteren Einflussgrößen abhängig sind. Deutlich zu sehen ist die Wirkung der Glättung, durch die die maximalen Abweichungen erheblich reduziert werden.

### 8 Fahrzeugrichtung und Trajektorienrichtung, Schwimmwinkel

Bei der Verwendung des Richtungswinkels  $\varphi_z$  eines Kreises oder des Inertialsystems für die Koppelnavigation muss bedacht werden, dass der Richtungssensor, da er starr mit dem Fahrzeugkörper verbunden ist, immer die aktuelle Fahrzeugrichtung wiedergibt, die bei Kurvenfahrten nicht die momentane Bewegungsrichtung ist. Bei Kurvenfahrten muss dieser Unterschied (Schwimmwinkel  $\beta$ ) berücksichtigt werden, um für die Koppelnavigation den tatsächlichen Kurswinkel  $\psi$  zu ermitteln.

$$\Psi = \varphi_z + \beta \tag{9}$$

Bei langsamen Kurvenfahrten treten keine Seitenkräfte und damit auch keine Schräglaufwinkel an den Rädern der Vorder- und Hinterachse auf. Die Räder rollen ohne seitlichen Schlupf. Der Vorderradeinschlagswinkel, mit  $\delta_A$  (Ackermannwinkel) bezeichnet, kann aus den in Abb. 5 dargestellten geometrischen Beziehungen abgeleitet werden:

$$\tan \delta_A = \frac{l}{\sqrt{R^2 - l_h^2}}, \text{ für kleine Winkel gilt: } \delta_A = \frac{l}{R} \tag{10}$$

- mit  $l$ : Radstand
- $l_h$ : Abstand Schwerpunkt zu Hinterachse
- $R$ : Kreisradius
- $SP$ : Fahrzeugschwerpunkt

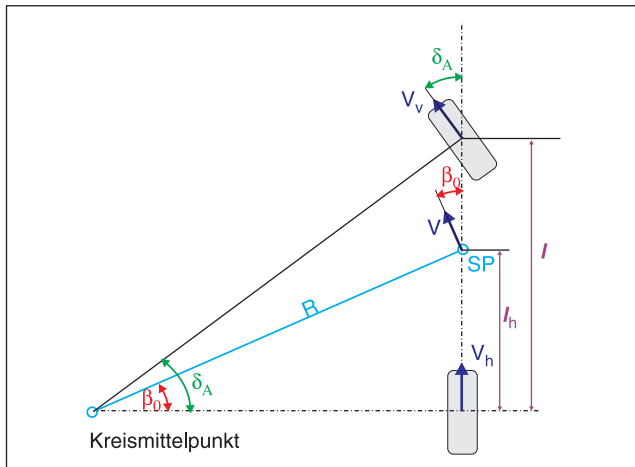


Abb. 5 : Geometrischer Zusammenhang zwischen Schwimmwinkel, Vorderradeinschlagswinkel und Kreisradius bei langsamer Fahrt (Zomotor 1991)

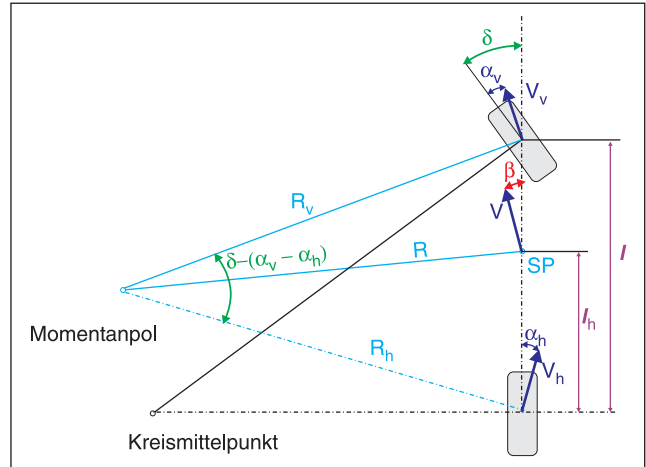


Abb. 6: Geometrischer Zusammenhang zwischen Schwimmwinkel, Schräglaufwinkeln und Kreisradius bei schneller Fahrt (Zomotor 1991)

Aufgrund der Kurvengeometrie ergibt sich bei schlupffreiem Rollen der Schwimmwinkel  $\beta_0$  im Schwerpunkt:

$$\beta_0 = \delta_A \cdot \frac{l_h}{l} = \frac{l_h}{R} \tag{11}$$

Wenn bei der Kreisfahrt die Geschwindigkeit größer wird, rollen die Räder nicht mehr schlupffrei, sondern unter Schräglaufwinkeln und der Momentanpol fällt nicht länger mit dem Kreismittelpunkt zusammen (siehe Abb. 6) Der Vorderradeinschlagswinkel ergibt sich unter diesen Bedingungen aus dem Ackermannwinkel und der Differenz der Schräglaufwinkel:

$$\delta = \delta_A + \alpha_v - \alpha_h \tag{12}$$

Den Schwimmwinkel  $\beta$  erhält man unter Berücksichtigung der Fahrzeugmasse  $m_F$ , der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  des Schwerpunktes und des Schräglaufoeffizienten  $C_h$  der Hinterachse (Mitschke 1990):

$$\beta = \beta_0 - \frac{m_F}{C_h} \cdot \frac{l_v}{l} \cdot \frac{v^2}{R} \tag{13}$$

Unter Berücksichtigung der Beziehung  $R = \frac{v}{\dot{\varphi}_z}$  kann der

Schwimmwinkel  $\beta$  als Funktion der Richtungswinkelgeschwindigkeit beschrieben und als Korrektur an den Richtungswinkel  $\varphi_z$  angebracht werden.

$$\beta = \frac{\dot{\varphi}_z}{v} \left( l_h - \frac{m_F}{C_h} \cdot \frac{l_v}{l} \cdot v^2 \right) \tag{14}$$

### 9 Von der Trajektorie zur Verkehrswegeachse

Nach der Auswertung liegt die Trajektorie des Fahrzeuges, genauer des Nullpunktes des fahrzeugfesten Koordinatensystems, als optimal geschätzte dreidimensionale

orientierte Punktfolge vor. Um daraus die Verkehrswegeachse bestimmen zu können, müssen Zusatzinformation über die Bewegung des Fahrzeuges auf der Fahrbahn berücksichtigt werden. Im einfachsten Ansatz kann bei einer gleichmäßigen Fahrt mit konstantem Abstand zur Mittellinie dieser Abstand in einer Transformation berücksichtigt werden. Wesentlich genauer lässt sich die Bewegung des Fahrzeuges gegenüber der Fahrbahn aus den Bildern eines CCD-Systems oder mit einem Laserscanner ermitteln. Der Fahrbahnrand bzw. die Mittelleitlinie können direkt als Punktfolge im Bild gemessen oder mit Hilfe von Bildverarbeitungssoftware als Linienobjekt bestimmt werden. Aus den Messdaten von Hin- und Rückfahrt kann durch Mittelung der Koordinaten der Mittellinie die Verkehrswegeachse als dreidimensionale Punktfolge mit beliebigen Punktabstand konstruiert werden.

## 10 Zerlegung der Trassenachse in Trassierungselemente

Oft ist es sinnvoll, die Verkehrswegeachse nicht nur als Punktfolge sondern auch mit ihren geometrischen Elementen darzustellen. Insbesondere in Straßendatenbanken werden die Straßenachsen meist als Folge der Trassierungselemente abgelegt und die Georeferenzierung durch fortlaufende Kilometrierung hergestellt. Eine Erkennung der Elemente ist im Grundriss kaum möglich. Wenn man jedoch die Darstellung der Trajektorie im Winkel- und Krümmungsbild nutzt, so ist eine Bestimmung der Trassierungselemente Gerade, Übergangsbogen und Kreisbogen, mit zufriedenstellender Genauigkeit möglich (Sternberg/Caspary 1994).

Aus der Darstellung der Trassierungselemente in Abb. 7 im Grundriss, Winkel- und Krümmungsbild er-

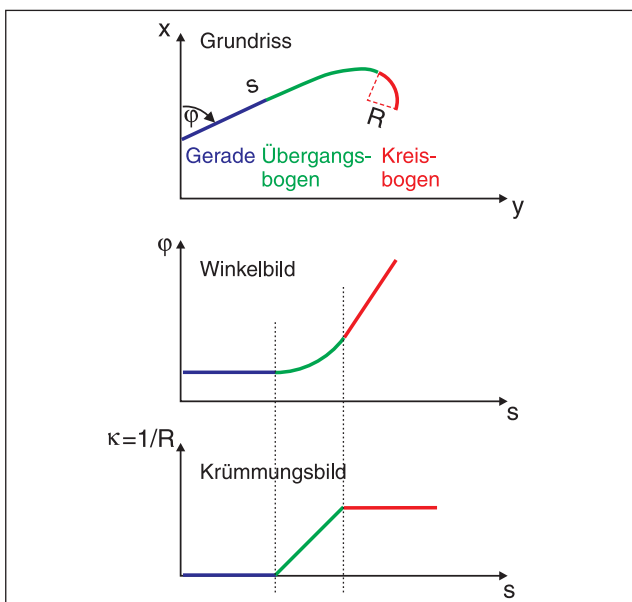


Abb. 7: Geometrische Elemente der Trassierung (Gerade, Übergangsbogen, Kreisbogen) im Grundriss, im Winkel- und im Krümmungsbild

kennt man die Vorteile des Krümmungsbildes. Die unterschiedlichen geometrischen Eigenschaften kommen hier klar heraus und ermöglichen die Festlegung der Anfangs- und Endpunkte der einzelnen Elemente. Wird das Krümmungsbild aus der gemessenen Trajektorie abgeleitet, so ist es stark verrauscht und erfordert zunächst eine Glättung. Danach können die Elemente durch die stückweise Schätzung von Regressionsgeraden identifiziert werden. In einer abschließenden Ausgleichung im Grundriss werden die Punktabstände senkrecht zur Trasse minimiert. Mit den Trassierungselementen und ihren Parametern als Ergebnis, lassen sich dann auch leicht andere Auswertungen vornehmen, wie die Überprüfung der Fahrdynamik für verschiedene Geschwindigkeiten.

Im Auswertepaket des Systems KiSS sind die beschriebene Bestimmung der Fahrzeugtrajektorie und der Trasse umgesetzt worden. In mehreren Projekten konnte das System die Leistungsfähigkeit und Alltagstauglichkeit zeigen (Heister et al. 2002b).

## Literatur

- Caspary, W., Wang, J.: Redundanzanteile und Varianzkomponenten im Kalman Filter. *zfv* 123, S. 121–128, 1998.
- Gelb, A. (ed): Applied Optimal Estimation. The Analytic Sciences Corporation & The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, London, 1974.
- Heister, H., Gräfe, G., Klemm, J., Sternberg, H.: Signalerfassung im Messfahrzeug. *zfv* 127, 2002.
- Heister, H., Sternberg, H., Klemm, J., Gräfe, G.: Projekterfahrung mit kinematischer Vermessung. *zfv* 127, 2002.
- Mitschke, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge. Band C: Fahrverhalten. Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- Schwarz, W.: Kinematische Sensoren – Klassifizierung und Leistungsfähigkeit. In: Kinematische Meßmethoden in der Ingenieurvermessung, S. 54–97, Wittwer Verlag, Stuttgart, 1996.
- Sternberg, H., Caspary, W.: Determination of Alignment Elements of Surveyed Routes for Geographical Information Systems. In: International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation. S. 359–364, Banff, Canada, 1994.
- Sternberg, H., Caspary, W., Heister, H.: Determination of the Trajectory surveyed by the Mobile Surveying System KiSS. In: Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering (TU Wien), S. 361–366. Wien, 1998.
- Sternberg, H.: Zur Bestimmung der Trajektorie von Landfahrzeugen mit einem hybriden Meßsystem, Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformation, UniBwM, Heft 67, Neubiberg, 2000.
- Wang, J., Sternberg, H.: Modellentwicklung für die kinematische Vermessung von Landverkehrswegen. Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformation, UniBwM, Heft 60 Band 1, S. 317–331, Neubiberg, 2001.
- Zomotor, A.: Fahrwerktechnik: Fahrverhalten. Vogel-Verlag, Würzburg, 1991.

## Anschrift der Autoren

Prof. Dr.-Ing. Harald Sternberg  
 Fachbereich Geomatik  
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
 Hebebrandstraße 1, D-22297 Hamburg  
 h.sternberg@rzcn.haw-hamburg.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Caspary  
 Institut für Geodäsie  
 Universität der Bundeswehr München  
 Werner-Heisenberg-Weg 37, D-85577 Neubiberg  
 wilhelm.caspary@unibw-muenchen.de