



(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2020 210 080.2**

(51) Int Cl.: **G06F 17/10** (2006.01)

(22) Anmeldetag: **10.08.2020**

(43) Offenlegungstag: **10.02.2022**

(71) Anmelder:

**Robert Bosch Gesellschaft mit beschränkter
Haftung, 70469 Stuttgart, DE**

(72) Erfinder:

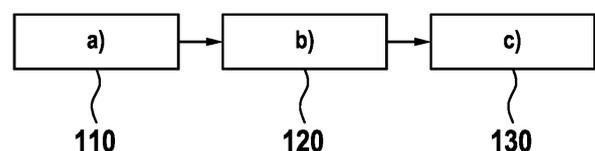
Weissenmayer, Simon, 74223 Flein, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Ermitteln mindestens eines Systemzustands mittels eines Kalman-Filters**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln mindestens eines Systemzustands mittels eines Kalman-Filters, wobei dem Kalman-Filter mindestens ein von mindestens einem Sensor des Systems gemessener Messwert zugeführt wird, umfassend zumindest folgende Schritte:

- a) Durchführen einer Schätzung des Systemzustands mittels des Kalman-Filters, wobei ein Schätzergebnis und mindestens eine zugehörige Information über die Verlässlichkeit des Schätzergebnisses ausgegeben werden,
- b) Ermitteln einer Diskrepanz zwischen zumindest einem zu der Schätzung zugehörigen Modellwert und zumindest einem zu der Schätzung zugehörigen Messwert,
- c) Korrigieren mindestens einer Information über die Verlässlichkeit der Schätzung unter Verwendung der ermittelten Diskrepanz.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln mindestens eines Systemzustands mittels eines Kalman-Filters, ein Computerprogramm zur Durchführung des Verfahrens, ein maschinenlesbares Speichermedium, auf dem das Computerprogramm gespeichert ist sowie ein System zur Ermittlung der Position eines mobilen Objekts, wie insbesondere eines Fahrzeugs, eingerichtet zur Durchführung des Verfahrens. Die Erfindung kann insbesondere im Zusammenhang mit dem zumindest teilweise automatisierten bzw. autonomen Fahren zur Anwendung kommen.

Stand der Technik

[0002] Kalman-Filter dienen der iterativen Schätzung von Systemzuständen auf Basis von üblicherweise fehlerbehafteten Beobachtungen. Als besonders vorteilhaft haben sich Kalman-Filter in diesem Zusammenhang insbesondere für Anwendungsfälle bewährt, bei denen Sensorinformationen von verschiedenen Sensoren insbesondere mit Modellinformationen zusammengeführt (bzw. fusioniert) werden müssen. Darüber hinaus werden Kalman-Filter häufig in eingebetteten Systemen verwendet, da ihre Berechnungen vorteilhaft genau und robust sind. Außerdem können Mikrokontroller die Berechnungen eines Kalman-Filters vorteilhaft effizient ausführen.

[0003] Die Kalmanfiltergleichungen können in Matrixschreibweise wie folgt beschrieben werden:

$$\hat{x}_k = F_k \hat{x}_{k-1} + B_k u_k \quad (GL1)$$

$$P_k = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k \quad (GL2)$$

$$\underbrace{H_k K'}_{\tilde{K}} = \underbrace{H_k P_k H_k^T}_{\tilde{\Sigma}_0} \left(\underbrace{H_k P_k H_k^T}_{\tilde{\Sigma}_0} + \underbrace{R_k}_{\tilde{\Sigma}_1} \right)^{-1} \quad (GL3)$$

$$\underbrace{H_k \hat{x}_k'}_{\mu'} = \underbrace{H_k \hat{x}_k}_{\mu_0} + \underbrace{H_k K'}_{\tilde{K}} \left(\underbrace{z_k}_{\mu_1} - \underbrace{H_k \hat{x}_k}_{\mu_0} \right) \quad (GL4)$$

$$\underbrace{H_k P_k' H_k^T}_{\tilde{\Sigma}' } = \underbrace{H_k P_k H_k^T}_{\tilde{\Sigma}_0} - \underbrace{H_k K'}_{\tilde{K}} \underbrace{H_k P_k H_k^T}_{\tilde{\Sigma}_0} \quad (GL5)$$

[0004] Die expliziten Gleichungen mit den Formelzeichen $K, \Sigma', \Sigma_0, \Sigma_1, \mu', \mu_0, \mu_1$, können insbesondere dann verwendet werden, wenn zu jeder Messgröße eine korrespondierende Modellgröße mit gleicher Skalierung existiert und/oder umgekehrt zu jeder Modellgröße eine korrespondierende Messgröße mit gleicher Skalierung existiert. Ist das nicht der Fall, können beispielsweise die Gleichungen GL3

bis GL5 mit den Formelzeichen H, K', P, R, \hat{x}, z verwendet werden. Für eine numerische Berechnung können diese Gleichungen zuvor in eine explizite Form gebracht werden, was insbesondere durch Teilen von H bzw. H^T auf beiden Seiten der Gleichung(en) geschehen kann.

[0005] Die Gleichungen GL1 und GL2 beschreiben den iterativen Schätzvorgang des Kalman-Filters und die Gleichungen GL3 bis GL5 die Korrektor bzw. Fusion der iterativ geschätzten Modellwerte mit sensorisch erfassten Messwerten. Zur näheren Erläuterung wird auf die Beschreibung eines typischen Aufbaus eines Kalman-Filters im Zusammenhang mit der **Fig. 1** verwiesen.

[0006] Allerdings sind Kalman-Filter vergleichsweise aufwändig und es gibt zahlreiche Einstellmöglichkeiten (insbesondere die Systemmatrix F_k , die Varianzmatrix R_k des Messrauschens und die Varianzmatrix Q_k des Systemrauschens), die für das jeweilige zu beschreibende Systemverhalten gewählt und/oder eingestellt werden müssen. Das erschwert die Nutzung des Kalman-Filters für neue Anwendungen und/oder die Pflege bestehender Anwendungen.

[0007] Zum Teil werden auch sogenannte erweiterte Kalman-Filter eingesetzt, um auch nichtlineare dynamische Prozesse modellieren zu können und/oder sogenannte adaptive Kalman-Filter (bzw. ROSE-Filter), um die zahlreichen Einstellmöglichkeiten insbesondere die Werte der Matrizen R_k und Q_k für das Mess- und Systemrauschen mit Hilfe zusätzlicher Filter automatisch während der Laufzeit anpassen zu können. Allerdings besteht dabei ein vergleichsweise hoher Aufwand darin, die zusätzlichen Filter auszulagern bzw. zu konfigurieren, wobei das ROSE-Filter mit seinen zusätzlichen Filtern nochmals schwerer zu konfigurieren ist.

Offenbarung der Erfindung

[0008] Hier vorgeschlagen wird gemäß Anspruch 1 ein Verfahren zum Ermitteln mindestens eines Systemzustands mittels eines Kalman-Filters, wobei dem Kalman-Filter mindestens ein von mindestens einem Sensor des Systems gemessener Messwert zugeführt wird, umfassend zumindest folgende Schritte:

- a) Durchführen einer Schätzung des Systemzustands mittels des Kalman-Filters, wobei ein Schätzergebnis und mindestens eine zugehörige Information über die Verlässlichkeit des Schätzergebnisses ausgegeben werden,
- b) Ermitteln einer Diskrepanz zwischen zumindest einem zu der Schätzung zugehörigen Modellwert und zumindest einem zu der Schätzung zugehörigen Messwert,

c) Korrigieren mindestens einer Information über die Verlässlichkeit der Schätzung unter Verwendung der ermittelten Diskrepanz.

[0009] Die angegebene Reihenfolge der Schritte a), b) und c) ist beispielhaft und kann in der so angegebenen Reihenfolge beispielsweise bei einem regulären Betriebsablauf zumindest einmal zur Durchführung des Verfahrens durchgeführt werden. Alternativ oder zusätzlich können die Schritte a), b) und c) zumindest teilweise parallel oder gleichzeitig durchgeführt werden. Das Verfahren kann beispielsweise von einer Steuergerät, wie etwa einem (Micro-)Controller durchgeführt werden, der beispielsweise ein Bestandteil des hier auch beschriebenen Systems sein kann.

[0010] Das Verfahren ermöglicht in vorteilhafter Weise das Bereitstellen eines Kalman-Filters mit einer Plausibilisierung von Vorhersage (bzw. Schätzung) und/oder Messung. In diesem Zusammenhang kann das Verfahren insbesondere dazu beitragen ein (ansonsten typisches) Kalman-Filter derart zu erweitern, dass Unstimmigkeiten bzw. eine Diskrepanz durch (Mess-) Fehler und/oder große Ungenauigkeiten bei der Modellbildung und/oder der Konfiguration und/oder Abweichungen durch gestörte Messwerte von den betrachteten Referenzsituationen erkannt werden können. Eine Differenz zwischen den modellierten Werten und den gemessenen Werten wird bereits in den üblichen Kalman-Filter Gleichungen in dem Klammerausdruck in obiger Gleichung GL4 ermittelt. Dort wird diese Differenz jedoch nur bei der Ermittlung des fusionierten (neuen) Zustandsvektors \hat{x}_k' berücksichtigt bzw. nur auf den Modellwert bzw. Modell-Zustand zurückgeführt. Dies kann bei dem hier beschriebenen Verfahren auch weiterhin so durchgeführt werden. Darüber hinaus wird hier nun erstmals vorgeschlagen, eine Diskrepanz auf die Information über die Verlässlichkeit der Schätzung, insbesondere auf die Schätzunsicherheit (Formelzeichen: P bzw. Σ_0) und/oder die Messunsicherheit (Formelzeichen: R bzw. Σ_1) zurückzuführen. Dies trägt in besonders vorteilhafter Weise dazu bei, dass sich die Höhe der Diskrepanz (unmittelbar) auf die Höhe zumindest eines Maßes für die Verlässlichkeit der Schätzung auswirkt. So kann beispielsweise das Maß für die Schätzunsicherheit (Formelzeichen: P) und/oder die Messunsicherheit (Formelzeichen: R) entsprechend bzw. in Abhängigkeit der ermittelten Diskrepanz verändert werden, insbesondere mit steigender Diskrepanz steigen. Das Verfahren erlaubt somit in besonders vorteilhafter Weise erstmals, dass sich ein Abstand zwischen (zueinander zugehörigen) Modellwerten und Messwerten auch unmittelbar auf die Information über die Verlässlichkeit des Schätzergebnisses auswirken kann.

[0011] Die beschriebene Berücksichtigung der Diskrepanz und insbesondere eine (entsprechende)

Herabsetzung zumindest einer Information über die Verlässlichkeit der Schätzung im Falle von weit auseinander liegenden Werten für den Modellwert und den Messwert ist insbesondere für sicherheitskritische Anwendungsfälle besonders vorteilhaft. Zu den besonders im Fokus stehenden sicherheitskritischen Anwendungsfällen zählt insbesondere das zumindest teilweise automatisierte bzw. autonome Fahren, bei dem die Verlässlichkeit des Schätzergebnisses in der Regel innerhalb definierten Bandbreiten liegen und/oder möglichst exakt ermittelbar sein soll. Darüber hinaus kann das Verfahren dazu beitragen, dass, wenn eine Diskrepanz (einer physikalischen Größe) erkannt bzw. ermittelt wurde, beispielsweise Messwerte gegenüber gestörten Modellwerten stärker gewichtet werden können oder umgekehrt.

[0012] Das Verfahren trägt insbesondere zum (kontinuierlichen) Ermitteln von Systemzuständen mittels eines Kalman-Filters und in Abhängigkeit von Sensordaten bei. Dem Kalman-Filter können Messwerte von mehreren, verschiedenen bzw. verschiedenartigen Sensoren des Systems zugeführt werden, um unter Berücksichtigung dieser Messwerte eine Schätzung durchzuführen. Der mindestens eine Systemzustand kann beispielsweise die (momentane) (Eigen-)Position eines mobilen, insbesondere entlang der Erdoberfläche bewegbaren Objekts bzw. Mobilteils, wie etwa eines (Kraft-) Fahrzeugs (Automobils), eines Schiffs eines Flugzeugs, eines Smartphones oder einer Smartwatch umfassen. Weiterhin kann der mindestens eine Systemzustand eine (momentane) Geschwindigkeit, eine (momentane) Bewegungsrichtung und/oder eine (momentane) Beschleunigung des Objekts umfassen. Der Einsatz des Beschriebenen Verfahrens ist grundsätzlich für beliebige Sensordatenfusionsaufgaben vorteilhaft, wie zum Beispiel für die Positionsbestimmung, die Objekterkennung und/oder die Fahrdynamikregelung eines Fahrzeugs. Darüber hinaus kann das beschriebene Verfahren auch für eine Modellierung von Übertragungseigenschaften eines Sensors einsetzbar sein, um zum Beispiel Messrauschen und anderen störende Einflüsse auf das Sensorsignal zu reduzieren.

[0013] In Schritt a) erfolgt ein Durchführen einer Schätzung des Systemzustands mittels des Kalman-Filters, wobei ein Schätzergebnis und mindestens eine zugehörige Information über die Verlässlichkeit des Schätzergebnisses ausgegeben werden. Als Schätzergebnis kann beispielsweise ein insbesondere korrigierter bzw. fusionierter (bzw. neuer) Modellwertvektor (Formelzeichen: μ') und/oder ein insbesondere korrigierter bzw. fusionierter (bzw. neuer) Zustandsvektor (Formelzeichen: \hat{x}_k') ausgegeben werden. Als zugehörige Information über die Verlässlichkeit des Schätzergebnisses kann bei-

spielsweise eine Schätzunsicherheit, wie zum Beispiel eine insbesondere korrigierte bzw. fusionierte Kovarianzmatrix (Formelzeichen: P_k' bzw. Σ') angegeben werden.

[0014] In Schritt b) erfolgt ein Ermitteln einer Diskrepanz zwischen zumindest einem zu der Schätzung zugehörigen Modellwert und zumindest einem zu der Schätzung zugehörigen Messwert. Beispielsweise kann ein Ermitteln einer Diskrepanz zwischen den zu der Schätzung zugehörigen Modellwerten bzw. dem zu der Schätzung zugehörigen Modellwertvektor (Formelzeichen: μ_0) und den zu der Schätzung zugehörigen Messwerten bzw. dem zu der Schätzung zugehörigen Messwertvektor (Formelzeichen: μ_1) erfolgen. Insbesondere können der Modellwert und/oder der Messwert quadratisch in die Berechnung der Diskrepanz einfließen. Vorzugsweise werden bei der Berechnung der Diskrepanz der quadratische Fehler zwischen dem Modellwertvektor (Formelzeichen: μ_0) und dem fusionierter Modellwertvektor (Formelzeichen: μ_1) und/oder der quadratischen Fehler zwischen dem Messwertvektor (Formelzeichen: μ_1) und dem fusionierter Modellwertvektor (Formelzeichen: μ') berücksichtigt, insbesondere summiert. Beide können mit der jeweiligen Kovarianzmatrix des Modellwertvektors bzw. des Messwertvektors gewichtet werden.

[0015] In Schritt c) erfolgt ein Korrigieren mindestens einer Information über die Verlässlichkeit der Schätzung unter Verwendung der ermittelten Diskrepanz. Bei der hier korrigierten Information über die Verlässlichkeit der Schätzung kann es sich beispielsweise um die in Schritt a) genannte Information über die Verlässlichkeit des Schätzergebnisses handeln. In diesem Zusammenhang kann in Schritt c) beispielsweise eine insbesondere fusionierte Schätzunsicherheit, wie etwa eine fusionierte Kovarianzmatrix (Formelzeichen: P_k' bzw. Σ'), zum Beispiel durch Hinzuaddieren der ermittelten Diskrepanz, korrigiert werden. Alternativ oder kumulativ kann in Schritt c) beispielhaft eine (nicht-fusionierte) Schätzunsicherheit (Formelzeichen: P) und/oder eine Messunsicherheit (Formelzeichen: R) korrigiert werden. In diesem Zusammenhang kann beispielsweise eine Kovarianzmatrix (Formelzeichen: Σ_0) des Modellwertvektors (Formelzeichen: μ_0) und/oder eine Kovarianzmatrix (Formelzeichen: Σ_1) des Messwertvektors (Formelzeichen: μ_1), insbesondere durch Hinzuaddieren der ermittelten Diskrepanz, korrigiert werden.

[0016] Die Verwendung der Diskrepanz trägt in vorteilhafter Weise dazu bei, die Berechnung der Varianz (Formelzeichen: P_k') aus oben angegebener Gleichung (GL5) durch die Berücksichtigung der Messwerte (Formelzeichen: \bar{z}_k) und der modellier-

ten Zustände (Formelzeichen: \hat{x}_k) zu verbessern bzw. zu korrigieren. Dabei kann insbesondere bei unplausibel großen Unterschieden zwischen den Messwerten (Formelzeichen: \bar{z}_k) und den modellierten Zuständen (Formelzeichen: \hat{x}_k) bzw. einer großen Diskrepanz (Formelzeichen: D bzw. d) die berechnete Varianz (Formelzeichen: P_k') erhöht werden. Die Berücksichtigung der Diskrepanz erfolgt jedoch vorteilhaft kontinuierlich und insbesondere nicht nur bei unplausibel großen Unterschieden.

[0017] Die Korrektur kann insbesondere derart erfolgen, dass die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der mindestens einen Information über die Verlässlichkeit der Schätzung, vorzugsweise der fusionierten Modellunsicherheit (Formelzeichen: P_k' bzw. Σ') angepasst wird. Dieses Anpassen kann beispielsweise derart erfolgen, dass die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung breiter wird und/oder eine größere Überlappung mit den Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen von Modellunsicherheit (Formelzeichen: P bzw. Σ_0) und Messunsicherheit (Formelzeichen: R bzw. Σ_1) erreicht werden kann. Dies kann in vorteilhafter Weise dazu beitragen, dass Fälle besser berücksichtigt werden können, bei denen die Messwerte und Modellwerte zwar jeweils mit einer (vermeintlich) hohen Sicherheit berechnet wurden, tatsächlich jedoch vergleichsweise weit auseinander liegen. Somit kann die Korrektur dazu beitragen, dass unerkannte Messfehler und/oder Auslegungsfehler des Modells die Schätzung vorteilhaft weniger stark beeinflussen.

[0018] Nach einer vorteilhaften Ausgestaltung wird vorgeschlagen, dass es sich bei dem System um ein System zur Ermittlung der Position eines (Kraft-)Fahrzeugs handelt. Das System kann zumindest teilweise in oder an dem Fahrzeug angeordnet sein. Das Fahrzeug kann beispielsweise mittels eines entsprechend konfigurierten Steuergeräts vorteilhafterweise für einen zumindest teilweise automatisierten und/oder autonomen Fahrbetrieb eingerichtet sein. Das Steuergerät kann mit dem System verbunden sein, um Positionsdaten von dem System zu erhalten. Das System kann mehrere, insbesondere verschiedene bzw. verschiedenartigen Sensoren umfassen oder mit Sensoren des Fahrzeugs verbunden sein. Die Sensoren können beispielsweise zumindest einen GNSS-Sensor und einen (optischen oder akustischen) Umfeldsensor, wie beispielsweise einen Kamera-Sensor, LIDAR-Sensor, RADAR-Sensor, Ultraschall-Sensor oder dergleichen umfassen. Die Messwerte der Sensoren können mittels des hier beschriebenen Verfahrens bzw. mittels des Kalman-Filters fusioniert werden.

[0019] Nach einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung wird vorgeschlagen, dass das Korrigieren gemäß Schritt c) kontinuierlich erfolgt. Dies kann

mit anderen Worten insbesondere auch so beschrieben werden, dass zu möglichst jedem Zeitschritt des Kalman-Filters eine Diskrepanz ermittelt und zum Korrigieren verwendet, insbesondere auf die mindestens eine Information über die Verlässlichkeit der Schätzung aufaddiert wird. Das kontinuierliche Korrigieren unterscheidet sich beispielsweise von einem Schwellwertvergleich zur Plausibilisierung, bei dem ein Korrigieren dann erfolgt, wenn eine ermittelte Diskrepanz oberhalb eines definierten Schwellwerts liegt. Demgegenüber trägt das kontinuierliche Ermitteln der Diskrepanz und Verwendung dieser Diskrepanz zur Korrektur gemäß Schritt c) in vorteilhafter Weise dazu bei, dass ein Grad der Plausibilität erfasst und kontinuierlich berücksichtigt werden kann. Dabei kann insbesondere abhängig von dem Grad eingegriffen werden. Dies ermöglicht eine vorteilhafte Überwachung, die insbesondere im Gegensatz zu Schwellwertvergleichen kontinuierlich ist.

[0020] Nach einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung wird vorgeschlagen, dass die Diskrepanz verwendet wird, um mindestens einen Konfidenzwert mindestens eines Modellwertes und/oder mindestens eines Messwerts des Kalman-Filters zu korrigieren. In diesem Zusammenhang kann die Diskrepanz zum Beispiel verwendet werden, um die Streuwerte des mindestens einen Modellwertes bzw. des Modellwertvektors (Formelzeichen: μ_0) und/oder die Streuwerte des mindestens einen Messwertes bzw. des Messwertvektors (Formelzeichen: μ_1) zu korrigieren, beispielhaft indem die Diskrepanz (bzw. das Maß der Diskrepanz) auf die betreffenden Werte aufaddiert wird. Bevorzugt kann die Diskrepanz verwendet werden, um die Varianz bzw. Kovarianzmatrix (Formelzeichen: Σ_0) des mindestens einen Modellwertes bzw. des Modellwertvektors (Formelzeichen: μ_0) und/oder die Varianz bzw. Kovarianzmatrix (Formelzeichen: Σ_1) des mindestens einen Messwertes bzw. des Messwertvektors (Formelzeichen: μ_1) zu korrigieren, beispielhaft in dem die Diskrepanz auf die betreffende Varianz bzw. Kovarianzmatrix aufaddiert wird.

[0021] Nach einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung wird vorgeschlagen, dass die Diskrepanz unter Verwendung folgender Elemente ermittelt bzw. berechnet wird:

- mindestens einem (zu der Schätzung zugehörigen) Modellwert,
- mindestens einem (zu der Schätzung zugehörigen) Messwert
- mindestens einem (zu der Schätzung zugehörigen, aus Modellwert und Messwert fusionierten) fusionierten Modellwert, und
- mindestens einem Kalman-Gain oder alternativ zum Kalman-Gain mit

- mindestens einer Kovarianz des mindestens einen Messwerts, und
- mindestens einer Kovarianz des mindestens einen Modellwerts.

[0022] Insbesondere können dabei (jeweilige) quadratische Fehler des Modellwerts und/oder des Messwerts ermittelt werden. Die ermittelten quadratischen Fehler können zur Bildung der Diskrepanz addiert werden. Vorzugsweise werden bei der Berechnung der Diskrepanz der quadratische Fehler zwischen dem Modellwert und dem fusionierten Modellwert und/oder der quadratischen Fehler zwischen dem Messwert und dem fusionierten Modellwert berücksichtigt, insbesondere addiert. Beide können mit der jeweiligen Kovarianz des Modellwerts bzw. des Messwerts gewichtet werden.

[0023] Beispielsweise kann die Diskrepanz gemäß folgender (insbesondere Herleitungs- und/oder Verständniszwecken der nachfolgenden expliziten Gleichungen dienende) Formel (Gleichung GL6) ermittelt werden:

$$d = \Sigma' \left(\frac{(\mu_0 - \mu')^2}{\Sigma_0} + \frac{(\mu_1 - \mu')^2}{\Sigma_1} \right) \quad (\text{GL6})$$

bei der d die Diskrepanz, μ_0 den Modellwert, μ_1 den Messwert, μ' den fusionierten Modellwert, Σ_0 die Kovarianz des Modellwerts, Σ_1 die Kovarianz des Messwerts und Σ' die Kovarianz des fusionierten Modellwerts beschreiben. Dabei können die benannten Variablen grundsätzlich eindimensional oder mehrdimensional sein. Im mehrdimensionalen Fall sind dementsprechend D die Diskrepanzmatrix, μ_0 der Modellwertvektor, μ_1 der Messwertvektor, μ' der fusionierte Modellwertvektor, Σ_0 die Kovarianzmatrix des Modellwertvektors, Σ_1 Kovarianzmatrix des Messwertvektors und Σ' die Kovarianzmatrix des fusionierten Modellwertvektors. In diesem Zusammenhang kann die Kovarianzmatrix des fusionierten Modellwertvektors mit folgender Formel (Gleichung GL6a) bestimmt werden:

$$\Sigma' = \frac{1}{\frac{1}{\Sigma_0} + \frac{1}{\Sigma_1}} \quad (\text{GL7a})$$

[0024] Die Diskrepanz d zwischen Modell- und Messwert kann demnach in vorteilhafter Weise auf Basis der mit der bisherigen Berechnung der Varianz Σ' gewichteten Summe aus der quadratischen Abweichung zwischen dem modellierten Wert μ_0 und dem fusionierten Mittelwert μ' bezogen auf die Varianz Σ_0 des modellierten Werts, sowie der quadratischen Abweichung des Messwerts μ_1 und dem fusionierten Mittelwert μ' bezogen auf die Varianz Σ_1 des Messwerts ermittelt werden.

[0025] Die so ermittelte Diskrepanz bzw. das Maß der Diskrepanz kann im Anschluss bzw. in Schritt c) bei der Berechnung der Varianz (Formelzeichen: Σ' bzw. P_k') bzw. bei einer (im selben Zeitschritt erfolgenden) Neuberechnung der (fusionierten) Varianz (der zuvor in diesem Zeitschritt berechneten (fusionierten) Varianz) hinzuaddiert werden. In diesem Zusammenhang kann die ermittelte Diskrepanz bzw. das Maß der Diskrepanz beispielsweise der Varianz bzw. Kovarianzmatrix (Formelzeichen: Σ_0) des mindestens einen Modellwertes bzw. des Modellwertvektors (Formelzeichen: μ_0) und/oder der Varianz bzw. Kovarianzmatrix (Formelzeichen: Σ_1) des mindestens einen Messwertes bzw. des Messwertvektors (Formelzeichen: μ_1) hinzu addiert werden.

[0026] Üblicherweise arbeitet das Kalman-Filter iterativ, wobei eine Schätzung zu einem bestimmten Zeitschritt auf der Schätzung des (unmittelbar) vorhergehenden Zeitschritts basiert bzw. aufbaut. Insbesondere wird in diesem Zusammenhang bei der Modellwertbildung gemäß beispielsweise Gleichungen GL1 und GL2 auf die Modellwerte des vorhergehenden Zeitschritts zurückgegriffen. Bei der Fusion gemäß beispielsweise Gleichungen GL3 bis GL5 werden jedoch Modell- und Messwerte des aktuellen Zeitschritts verwendet. In zuvor angegebener Formel zur Ermittlung der Diskrepanz d werden insbesondere die Varianzen Σ_0 , Σ_1 (und ggf. Σ') des aktuellen Zeitschritts und die Modell- und Messwerte μ_0 , μ_1 , und μ' des aktuellen Zeitschritts verwendet, um die Diskrepanz d zu berechnen. Hierzu kann vorteilhaft die Gleichung GL6a in die Gleichung GL6 eingesetzt werden.

[0027] Die daraus im aktuellen Zeitschritt berechnete Diskrepanz d kann in dem aktuellen oder ggf. in dem (unmittelbar) nachfolgenden Zeitschritt zur Korrektur verwendet werden. Dementsprechend kann in dem aktuellen Zeitschritt die Diskrepanz d aus dem aktuellen oder ggf. aus dem (unmittelbar) vorhergehenden Zeitschritt zur Korrektur verwendet werden. Alternativ kann auch vorgesehen sein, dass der aktuelle Zeitschritt mehrfach bzw. in mehreren Rechenschritten berechnet wird.

[0028] Insbesondere um die im aktuellen Zeitschritt berechnete Diskrepanz d vorteilhaft direkt in dem aktuellen Zeitschritt zur Korrektur verwenden zu können bzw. vorteilhaft sonst ggf. zusätzliche Rechenschritte in dem aktuellen Zeitschritt vermeiden zu können, ist es bevorzugt das Kalman-Gain (Formelzeichen: K') in die Gleichung GL6 einzubringen.

[0029] Die Diskrepanz kann unter Einbringung des Kalman-Gains gemäß folgender Formel (Gleichung GL6b) ermittelt werden:

$$d = (\mu_0 - \mu')^2 + K \left((\mu_1 - \mu')^2 - (\mu_0 - \mu')^2 \right) \quad (\text{GL6b})$$

bei der d die Diskrepanzmatrix, μ_0 den Modellwertvektor, μ_1 den Messwertvektor, μ' den fusionierten Modellwertvektor und K das Kalman-Gain beschreiben. Durch die Verwendung des Kalman-Gains gemäß Gleichung GL6b können in vorteilhafter Weise auch Matrixinversionen vermieden werden, wodurch Rechenzeit gespart werden kann.

[0030] In besonders vorteilhafter Weise können die Formel aus Gleichung GL6 mit Hilfe des Kalman-Gains und Koeffizientenbildung bzw. die Gleichung GL6b mit Koeffizientenbildung weiterhin derart vereinfacht werden, dass keine zusätzlichen Divisionen bzw. keine (unnötigen) Mehrfachberechnungen notwendig sind. Die entsprechend vereinfachte Formel ist in nachfolgender Gleichung GL7 angegeben:

$$d = w_0 + K(w_1 - w_0) \quad (\text{GL8})$$

[0031] Dabei können die Koeffizienten w_0 und w_1 bzw. Koeffizienten-Matrizen W_0 und W_1 gemäß den nachfolgenden Gleichungen (GL8 und GL9) ermittelt werden:

$$w_0 = (\mu_0 - \mu')^2 \quad (\text{GL9})$$

$$w_1 = (\mu_1 - \mu')^2 \quad (\text{GL10})$$

[0032] Es kann in diesem Zusammenhang idealerweise vorgesehen sein, dass die Koeffizienten w_0 und w_1 bzw. die Koeffizienten-Matrizen W_0 und W_1 nur einmalig pro Zeitschritt berechnet werden. Dies kann in vorteilhafter Weise dazu beitragen, dass ein Mikrokontroller die Rechenschritte des Filters deutlich schneller durchführen kann.

[0033] Mit $\mu_0 = H_k \hat{x}_k$, $\mu' = H_k \hat{x}_k$ und $\mu_1 = \bar{z}_k$ können die Gleichungen GL8 und GL9 für den Fall, dass Mess- und Modellwertvektor ggf. ungleicher Dimension sind bzw. sein können, (mittels der sogenannten Beobachtungs- bzw.

[0034] Transformationsmatrix H_k) beispielhaft in die nachfolgenden Gleichungen GL10 und GL11 umformulieren werden:

$$W_0 = H_k (\hat{x}_k - \hat{x}_k') (\hat{x}_k^T - \hat{x}_k'^T) H_k^T \quad (\text{GL11})$$

$$W_1 = (\bar{z}_k - H_k \hat{x}_k') (\bar{z}_k - H_k \hat{x}_k')^T \quad (\text{GL12})$$

[0035] Dementsprechend kann gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform vorgeschlagen werden, dass die Diskrepanz gemäß folgender Formel (Gleichung GL7a) ermittelt wird:

$$D = W_0 + H_k K' (W_1 - W_0) \quad (\text{GL13a})$$

bei der D die Diskrepanzmatrix, W_0 und W_1 jeweils Koeffizienten-Matrizen, K' die Kalman-Gain-Matrix und H_k die Transformationsmatrix beschreiben, wobei die Koeffizienten-Matrizen gemäß den vorhergehenden Formeln (Gleichungen GL10 und GL11) ermittelt werden.

[0036] Es kann beispielsweise zur vorteilhaften Korrektur der fusionierten Varianz (Formelzeichen: P_k' bzw. Σ') die obige Gleichung (GL5) wie folgt erweitert werden:

$$H_k P_k' H_k^T = H_k P_k H_k^T - H_k K' H_k P_k H_k^T + \underbrace{H_k H_k^T}_I \underbrace{D H_k H_k^T}_I \quad (\text{GL14})$$

[0037] Das Produkt der Beobachtungsmatrix H_k mit ihrer transponierten H_k^T ergibt die Identitätsmatrix I und kann für die folgende Umformung dieser Gleichung in der expliziten Form hinzugefügt werden. Die explizite Darstellung (vgl. Gleichung GL12a) kann durch kürzen von H_k und H_k^T hergeleitet werden. Eine entsprechende, explizite Darstellung ist insbesondere für eine Berechnung mit einem Mikrocontroller besonders vorteilhaft.

$$P_k' = P_k - K' H_k P_k + H_k^T D H_k \quad (\text{GL15a})$$

[0038] Bei der das Produkt aus Beobachtungsmatrix H_k und Kalman-Gain-Matrix K' ebenso durch Erweitern und Kürzen von H_k und H_k^T wie folgt hergeleitet werden kann:

$$K' = P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + R_k)^{-1} \quad (\text{GL3a})$$

[0039] Alternativ kann gemäß einer bevorzugten Ausführungsform zur Korrektur der fusionierten Kovarianz P_k' folgende Formel verwendet werden:

$$P_k' = (I - (K' H_k)) P_k + H_k^T D H_k \quad (\text{GL16c})$$

bei der I die Identitätsmatrix, K' die Kalman-Gain-Matrix, H_k die Beobachtungsmatrix, P_k die Kovarianzmatrix und D die Diskrepanzmatrix beschreiben.

[0040] Nach einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung wird vorgeschlagen, dass der Einfluss der ermittelten Diskrepanz auf die mindestens eine Information über die Verlässlichkeit der Schätzung mittels mindestens einem Gewichtungsfaktor oder einer Gewichtungsmatrix gewichtet wird. Der mindestens eine Gewichtungsfaktor bzw. die mindestens eine Gewichtungsmatrix kann in vorteilhafter Weise bewirken, dass die ermittelte Diskrepanz (bzw. das Maß der Diskrepanz) vorteilhaft möglichst gezielt

auf diejenigen Streuwerte (beispielsweise diejenigen Einträge der Kovarianzmatrix) aufgeschlagen werden kann, deren zugehörige Modellwerte oder Messwerte (voraussichtlich) fehlerbehaftet oder zumindest (voraussichtlich) fehlerbehafteter als die anderen Werte sind. Dies kann beispielsweise dazu beitragen, dass Messwerte gegenüber gestörten Modellwerten stärker gewichtet werden können oder umgekehrt. Der Gewichtungsfaktor bzw. die mindestens eine Gewichtungsmatrix kann beispielsweise bei der Auslegung des Kalmanfilters festgeschrieben werden oder vorzugsweise dynamisch von einer übergeordneten Funktion bzw. einer dem Kalmanfilter übergeordneten Steuereinrichtung (des Systems) während des Betriebs geändert bzw. angepasst werden, insbesondere um zumindest eine der vorangehend genannten Wirkungen zu erzielen.

[0041] Der Gewichtungsfaktor bzw. die Gewichtungsmatrix (Formelzeichen: E_1) kann beispielweise gemäß nachfolgender Gleichung GL13 in obige Gleichung GL12c integriert werden:

$$P_k' = (I - (K' H_k)) P_k + H_k^T E_1 D H_k \quad (\text{GL17})$$

[0042] Beispielsweise kann die Gewichtungsmatrix E_1 elementweise mit der Diskrepanz multipliziert werden.

[0043] In einem Fall, indem die Sensorsignale ungewöhnlich stark gestört sind, den Modellwerten allerdings besonders gut vertraut werden kann, bzw. die Sensorsignale (zumindest voraussichtlich) stärker gestört sind als die Modellwerte, ist es bevorzugt, dass die Diskrepanz (zumindest auch) auf die Messunsicherheit (Formelzeichen: R) bzw. die Kovarianzmatrix (Formelzeichen: Σ_1) des Messwertvektors aufgeschlagen wird. In diesem Fall kann die beispielhaft mit der Matrix E_2 gewichtete Diskrepanz D vorteilhaft gezielt in Gleichung GL3a der Varianzmatrix des Messrauschens (Formelzeichen: R) hinzuaddiert werden:

$$K' = P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + R_k + E_2 D)^{-1} \quad (\text{GL14})$$

[0044] Alternativ oder zusätzlich zur Erweiterung der Gleichung GL12c, kann auch die Gleichung GL12c mit der Matrix E_3 und Diskrepanz D erweitert werden, dass eine erhöhte Diskrepanz D zu einer stärkeren Berücksichtigung der Modellwerte führt (insbesondere ohne dass dazu die Modellunsicherheit P_k direkt erhöht werden muss):

$$K' = (P_k H_k^T + H_k^T E_3 D) (H_k P_k H_k^T + E_3 D + R_k)^{-1} \quad (\text{GL15})$$

[0045] Um bei den Ausführungsbeispielen gemäß den obigen Gleichungen (insbesondere GL14 und

GL15) etwaige algebraische Schleifen zu vermeiden, kann beispielsweise auf das D aus dem (unmittelbar) vorhergehenden Zeitschritt zurückgegriffen werden und/oder der aktuelle Zeitschritt mehrfach berechnet werden.

[0046] Eine ggf. alternative und vergleichsweise einfache Möglichkeit zur Berücksichtigung der Diskrepanz kann beispielsweise darin bestehen, die Diskrepanz in Gleichung GL2 zu addieren. Dabei kann die Diskrepanz vorteilhaft mit der Gewichtungsmatrix E_4 gewichtet werden. Dies ist in nachfolgender Gleichung GL16 veranschaulicht:

$$P_k = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k + E_4 H_k^T D H_k \quad (\text{GL16})$$

[0047] Die Entscheidung, an welcher Stelle des Gleichungssystems die Diskrepanz auf das Gleichungssystem wie stark einwirkt bzw. einwirken soll, kann beispielsweise bei der Auslegung des Kalmanfilters fest vorgegeben oder von einer (übergeordneten) Steuereinrichtung des Systems insbesondere dynamisch vorgegeben werden.

[0048] Ein besonders bevorzugtes Ausführungsbeispiel, bei dem die Diskrepanz an mehreren Stellen des Gleichungssystems eingefügt wird, um auf insbesondere die Modellunsicherheit (Formelzeichen: P), die Messunsicherheit (Formelzeichen: R) und die fusionierte Modellunsicherheit (Formelzeichen: P') einwirken zu können, und bei dem die Diskrepanz an der jeweiligen Stelle mit einer eigenen Gewichtungsmatrix (E_1 bis E_4) gewichtet wird, wird nachfolgend anhand folgendem, beispielhaften Pseudocode beschrieben, der insbesondere innerhalb einer Dauerschleife als Computerprogramm umgesetzt sein kann:

$$\hat{x}_{k-1} = \hat{x}'_k$$

$$P_{k-1} = P'_k$$

$$\hat{x}_k = F_k \hat{x}_{k-1} + B_k \bar{u}_k$$

$$P_k = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k + E_4 H_k D H_k^T$$

$$K' = (P_k H_k^T + H_k^T E_3 D) (H_k P_k H_k^T + E_3 D + R_k + E_2 D)^{-1}$$

$$\hat{x}'_k = \hat{x}_k + K' (\bar{z}_k - H_k \hat{x}_k)$$

$$W_0 = H_k (\hat{x}'_k - \hat{x}_k) (\hat{x}'_k - \hat{x}_k)^T H_k^T$$

$$W_1 = (H_k \hat{x}'_k - \bar{z}_k) (H_k \hat{x}'_k - \bar{z}_k)^T$$

$$D = W_0 + H_k K' (W_1 - W_0)$$

$$P'_k = (I - (K H_k)) P_k + E_1 H_k D H_k^T$$

[0049] Dabei können die Werte der Matrizen E_1 bis E_4 den Einfluss der Diskrepanz auf den jeweiligen Rechenschritt bestimmen.

[0050] Nach einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung wird vorgeschlagen, dass die ermittelte Diskrepanz mittels eines Tiefpass-Filters gefiltert wird. Da grundsätzlich mit jedem Berechnungsschritt große Diskrepanzunterschiede entstehen können, kann es von Vorteil sein, die Diskrepanz mit einem Tiefpass zu filtern. Die gefilterte Diskrepanz kann zur Korrektur zum Beispiel in einer oder mehrerer der Gleichungen GL13 bis GL16 eingesetzt werden.

[0051] Nach einem weiteren Aspekt wird ein Computerprogramm zur Durchführung eines hier vorgestellten Verfahrens vorgeschlagen. Dies betrifft mit anderen Worten insbesondere ein Computerprogramm(-produkt), umfassend Befehle, die bei der Ausführung des Programms durch einen Computer diesen veranlassen, ein hier beschriebenes Verfahren auszuführen.

[0052] Nach einem weiteren Aspekt wird ein maschinenlesbares Speichermedium vorgeschlagen, auf dem das hier vorgeschlagene Computerprogramm hinterlegt bzw. gespeichert ist. Regelmäßig handelt es sich bei dem maschinenlesbaren Speichermedium um einen computerlesbaren Datenträger.

[0053] Nach einem weiteren Aspekt wird auch ein System zur Ermittlung der Position eines mobilen Objekts, wie etwa eines Fahrzeugs vorgeschlagen, eingerichtet zur Durchführung eines hier beschriebenen Verfahrens. Das System zur Ermittlung der Position eines mobilen Objekts kann beispielsweise zur Ermittlung der Eigen-Position eines mobilen Objekts und/oder zur relativen Positionsmessung zu anderen, insbesondere bewegten mobilen Objekten, wie etwa Verkehrsteilnehmern vorgesehen und eingerichtet sein. Das System kann beispielsweise einen Bewegungs- und Positionssensor umfassen, der zur Durchführung eines hier beschriebenen Verfahrens eingerichtet ist. Weiterhin kann der Bewegungs- und Positionssensor beispielsweise GNSS-Daten und/oder Umfeldsensordaten (von Umfeldsensoren des mobilen Objekts bzw. Fahrzeugs) empfangen. Das System kann zur Durchführung des Verfahrens beispielsweise eine Recheneinrichtung, wie etwa einen (Micro-)Controller umfassen, der auf das hier auch beschriebene Computerprogramm zugreifen kann. In diesem Zusammenhang kann das Speichermedium beispielsweise ebenfalls ein Bestandteil des Systems oder mit diesem verbunden sein.

[0054] Die im Zusammenhang mit dem Verfahren erörterten Details, Merkmale und vorteilhaften Ausgestaltungen können entsprechend auch bei dem hier vorgestellten Computerprogramm und/oder dem Speichermedium und/oder dem System auftreten und umgekehrt. Insoweit wird auf die dortigen Ausführungen zur näheren Charakterisierung der Merkmale vollumfänglich Bezug genommen.

[0055] Die hier vorgestellte Lösung sowie deren technisches Umfeld werden nachfolgend anhand der Figuren näher erläutert. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Erfindung durch die gezeigten Ausführungsbeispiele nicht beschränkt werden soll. Insbesondere ist es, soweit nicht explizit anders dargestellt, auch möglich, Teilaspekte der in den Figuren erläuterten Sachverhalte zu extrahieren und mit anderen Bestandteilen und/oder Erkenntnissen aus anderen Figuren und/oder der vorliegenden Beschreibung zu kombinieren. Es zeigt schematisch:

Fig. 1: einen typischen Signallaufplan eines Kalman-Filters gemäß dem Stand der Technik,

Fig. 2: einen beispielhaften Ablauf des hier vorgestellten Verfahrens,

Fig. 3: ein beispielhaftes System zur Ermittlung der Position eines Fahrzeugs,

Fig. 4: einen beispielhaften Signallaufplan eines Kalman-Filters,

Fig. 5: einen weiteren beispielhaften Signallaufplan eines Kalman-Filters,

Fig. 6, Fig. 7: Veranschaulichungen von Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen gemäß dem Stand der Technik,

Fig. 8: eine Veranschaulichung von Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen, die mit dem Ausführungsbeispiel aus **Fig. 4** realisiert werden können, und

Fig. 9: eine Veranschaulichung von Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen, die mit dem Ausführungsbeispiel aus **Fig. 5** realisiert werden können.

[0056] **Fig. 1** zeigt schematisch einen typischen Aufbau eines Kalman-Filters gemäß dem Stand der Technik. Die diesem Aufbau zugrunde liegenden Kalmanfiltergleichungen können in Matrixschreibweise wie folgt beschrieben werden:

$$\hat{x}_k = F_k \hat{x}_{k-1} + B_k \bar{u}_k \quad (GL18)$$

$$P_k = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k \quad (GL19)$$

$$\underbrace{H_k K'}_{\mathbf{K}} = \underbrace{H_k P_k H_k^T}_{\Sigma_0} \left(\underbrace{H_k P_k H_k^T}_{\Sigma_0} + \underbrace{R_k}_{\Sigma_1} \right)^{-1} \quad (GL20)$$

$$\underbrace{H_k \hat{x}'_k}_{\mu'} = \underbrace{H_k \hat{x}_k}_{\mu_0} + \underbrace{H_k K'}_{\mathbf{K}} \left(\underbrace{\bar{z}_k}_{\mu_1} - \underbrace{H_k \hat{x}_k}_{\mu_0} \right) \quad (GL21)$$

$$\underbrace{H_k P'_k H_k^T}_{\Sigma'} = \underbrace{H_k P_k H_k^T}_{\Sigma_0} - \underbrace{H_k K'}_{\mathbf{K}} \underbrace{H_k P_k H_k^T}_{\Sigma_0} \quad (GL22)$$

[0057] Dabei beschreibt Gleichung (GL1) den geschätzten Zustandsvektor \hat{x}_k auf Basis des Zustandsvektors \hat{x}_{k-1} des vorhergehenden Zeitschritts (iterative Schätzung), der Systemmatrix F_k , der Kontrollmatrix B_k und des Kontrollvektors \bar{u}_k . Die Zustandsvektoren beschreiben hierbei in der Regel Mittelwerte von Gaussverteilungen. Mit anderen Worten ist gemäß Gleichung (GL1) die neue beste Schätzung \hat{x}_k eine Vorhersage, die aus der vorherigen besten Schätzung \hat{x}_{k-1} erstellt wurde, plus einer Korrektur für bekannte externe Einflüsse.

[0058] Gleichung (GL2) beschreibt in diesem Zusammenhang die zu der Gaussverteilung des geschätzten Zustandsvektors \hat{x}_k , gehörende Kovarianzmatrix P_k . Diese ergibt sich auf Basis der Kovarianzmatrix P_{k-1} des vorhergehenden Zeitschritts (iterative Schätzung), der Systemmatrix F_k und der Kovarianzmatrix des Systemrauschens Q_k . Mit anderen Worten wird gemäß Gleichung (GL2) die neue (Schätz-) Unsicherheit P_k aus der alten Unsicherheit P_{k-1} vorhergesagt, mit einer zusätzlichen Unsicherheit aus der Umgebung.

[0059] Gleichung (GL3) beschreibt das sogenannte Kalman-Gain K bzw. die Kalman-Gain-Matrix K' . Dieses wird auf Basis der Kovarianzmatrix P_k , der Beobachtungsmatrix H_k und der Kovarianzmatrix des Messrauschens R_k gebildet. Die Kovarianzmatrix P_k kann mit der Beobachtungsmatrix H_k die Kovarianzmatrix Σ_0 des Modellwertvektors μ_0 bilden.

[0060] Gleichung (GL4) beschreibt die Korrektur des geschätzten Zustandsvektor \hat{x}_k bzw. des Modellwertvektors μ_0 mit Messwerten, die durch den Messwertvektor z_k bzw. μ_1 dargestellt werden. Aus Gleichung (GL4) ergibt sich somit ein korrigierter bzw. fusionierter Modellwertvektor μ' bzw. ein neuer Zustandsvektor \hat{x}'_k , der als Eingang für einen zeitlich nachgelagerten Schätzschritt dienen kann.

[0061] Gleichung (GL5) beschreibt die Ermittlung der korrigierten bzw. fusionierten Kovarianzmatrix P'_k bzw. Σ' auf Basis der Kovarianzmatrix P_k bzw. Σ_0 des Zustandsvektors \hat{x}_k bzw. des Modellwertvektors μ_0 . Dabei fließt die Kovarianzmatrix R_k bzw. Σ_1 des Messwertvektors z_k bzw. μ_1 , über das Kalman-Gain K mit ein.

[0062] Somit beschreiben die Gleichungen (GL1) und (GL2) den iterativen Schätzvorgang des Kal-

man-Filters. Dieser Schätzvorgang ist in **Fig. 1** mit dem Bezugszeichen 10 gekennzeichnet. Die Gleichungen (GL3) bis (GL5) beschreiben die sich daran anschließende Korrektor bzw. Fusion der iterativ geschätzten Modellwerte mit sensorisch erfassten Messwerten. Diese Korrektur bzw. Fusion ist in **Fig. 1** mit dem Bezugszeichen 20 gekennzeichnet. Die korrigierten bzw. fusionierten (neuen) Modellwerte können in einem anschließenden Iterations-schritt in dem Schätzvorgang 10 verwendet werden. Dies ist mit dem rückführenden Pfeil in **Fig. 1** veranschaulicht.

[0063] **Fig. 2** zeigt schematisch einen beispielhaften Ablauf des hier vorgestellten Verfahrens. Das Verfahren dient zum Ermitteln mindestens eines Systemzustands mittels eines Kalman-Filters, dem mindestens ein von mindestens einem Sensor des Systems gemessener Messwert zugeführt wird. Bei dem System kann es sich beispielsweise um ein System zur Ermittlung der Position eines Fahrzeugs handeln.

[0064] Die mit den Blöcken 110, 120 und 130 dargestellte Reihenfolge der Schritte a), b) und c) ist beispielhaft und kann zur Durchführung des Verfahrens beispielsweise zumindest einmal in der dargestellten Reihenfolge durchlaufen werden. Darüber hinaus können die Schritte a), b) und c) auch zumindest teilweise parallel oder gleichzeitig durchgeführt werden.

[0065] In Block 110 erfolgt gemäß Schritt a) ein Durchführen einer Schätzung des Systemzustands mittels des Kalman-Filters, wobei ein Schätzergebnis und mindestens eine zugehörige Information über die Verlässlichkeit des Schätzergebnisses ausgegeben werden. In Block 120 erfolgt gemäß Schritt b) ein Ermitteln einer Diskrepanz zwischen zumindest einem zu der Schätzung zugehörigen Modellwert und zumindest einem zu der Schätzung zugehörigen Messwert.

[0066] Zum Beispiel kann in diesem Zusammenhang die Diskrepanz unter Verwendung folgender Elemente ermittelt werden:

- mindestens einem Modellwert,
- mindestens einem Messwert,
- mindestens einem fusionierten Modellwert, und
- mindestens einem Kalman-Gain oder alternativ zum Kalman-Gain mit
 - mindestens einer Kovarianz des mindestens einen Messwerts, und
 - mindestens einer Kovarianz des mindestens einen Modellwerts.

[0067] Beispielsweise kann die Diskrepanz dabei gemäß folgender Formel ermittelt werden:

$$d = \Sigma' \left(\frac{(\mu_0 - \mu)^2}{\Sigma_0} + \frac{(\mu_1 - \mu)^2}{\Sigma_1} \right)$$

bei der d die Diskrepanz, μ_0 den Modellwert, μ_1 den Messwert, μ' den fusionierten Modellwert, Σ_0 die Varianz des Modellwerts, Σ_1 die Varianz des Messwerts und Σ' die Varianz des fusionierten Modellwerts beschreiben und die Varianz Σ' des fusionierten Modellwerts gemäß der Formel

$$\Sigma' = \frac{1}{\frac{1}{\Sigma_0} + \frac{1}{\Sigma_1}}$$

ermittelt werden kann.

[0068] In Block 130 erfolgt gemäß Schritt c) ein Korrigieren mindestens einer Information über die Verlässlichkeit der Schätzung unter Verwendung der ermittelten Diskrepanz. In vorteilhafter Weise erfolge das Korrigieren dabei kontinuierlich. Weiterhin vorteilhaft kann die Diskrepanz verwendet werden, um mindestens einen Konfidenzwert mindestens eines Modellwertes und/oder mindestens eines Messwerts des Kalman-Filters zu korrigieren.

[0069] Es kann auch vorgesehen sein, dass der Einfluss der ermittelten Diskrepanz auf die mindestens eine Information über die Verlässlichkeit der Schätzung mittels einer Gewichtungsmatrix gewichtet wird. Weiterhin kann die ermittelte Diskrepanz beispielsweise auch mittels eines Tiefpass-Filters gefiltert werden.

[0070] **Fig. 3** zeigt schematisch ein beispielhaftes System 1 zur Ermittlung der Position eines Fahrzeugs 2. Das System 1 ist zur Durchführung eines hier beschriebenen Verfahrens vorgesehen und eingerichtet.

[0071] **Fig. 4** zeigt eine beispielhafte Erweiterung des Signallaufplans aus **Fig. 1**. Mit dem Kalman-Filter Signallaufplan gemäß **Fig. 4** kann beispielhaft eine Ausführungsform des hier beschriebenen Verfahrens umgesetzt werden.. Dabei erhöht eine Diskrepanz D zwischen den Messwerten z und Modellwerten x die Schätzunsicherheit P'. Hierzu wird beispielhaft die Gleichung GL5 durch die Gleichung GL12 ersetzt. Bei Modellfehlern, die zu einer großen Abweichung der Modellwerte x von den Messwerten z führen, können die Modellwerte x dabei vorteilhaft schneller an die Messwerte z angeglichen werden. Dies trägt in vorteilhafter Weise dazu bei, dass das Kalmanfiltermodell robuster gegenüber Auslegungsfehlern wird.

[0072] **Fig. 5** zeigt eine weitere alternative beispielhafte Erweiterung des Signallaufplans aus **Fig. 1**. Mit dem Kalman-Filter Signallaufplan gemäß **Fig. 5** kann

beispielhaft eine weitere Ausführungsform des hier beschriebenen Verfahrens umgesetzt werden. Dabei reduziert eine Diskrepanz D zwischen den Messwerten z und Modellwerten x den Einfluss der Messwerte z auf die Modellwerte. Hierzu wird beispielhaft die Gleichung zur Berechnung des Kalman-Gains K' (obige Gleichung GL3) durch die Gleichung GL14 ersetzt. Dadurch wird das Kalmanfiltermodell robuster gegenüber Messfehler. Um bei den Ausführungsbeispielen gemäß **Fig. 5** etwaige algebraische Schleifen zu vermeiden, kann beispielsweise auf das D aus dem (unmittelbar) vorhergehenden Zeitschritt zurückgegriffen werden und/oder es können Rechenschritte des aktuellen Zeitschritts mehrfach berechnet werden.

[0073] **Fig. 6** zeigt beispielhaft eine Veranschaulichung von Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen gemäß dem Stand der Technik, wie sie sich bei der Anwendung eines in **Fig. 1** veranschaulichten Kalman-Filters ergeben können. In diesem Zusammenhang zeigt **Fig. 6** plausible Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen. Bei einer plausiblen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung überlappen sich die Flächen der Gaußglocken von Messung z und Modell x stark. Die daraus fusionierte Gaußglocke x' liegt zwischen den beiden anderen Gaußglocken. Sie ist außerdem schmaler und höher.

[0074] **Fig. 7** zeigt beispielhaft eine weitere Veranschaulichung von Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen gemäß dem Stand der Technik, wie sie sich bei der Anwendung eines in **Fig. 1** veranschaulichten Kalman-Filters ergeben können. In diesem Zusammenhang zeigt **Fig. 7** nicht-plausible Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen. Bei einer nicht-plausiblen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung sind sich sowohl Messung z als auch Modell x sehr sicher, dass sie richtig liegen, geben aber voneinander stark abweichende Werte aus. Die Flächen der Gaußglocken von Messung z und Modell x überlappen kaum, dennoch berechnet der Kalman-Filter die fusionierte Gaußglocke x' auf die übliche Art.

[0075] Die daraus fusionierte Gaußglocke x' liegt zwischen den beiden anderen Gaußglocken. Sie ist jedoch zu schmal und/oder zu hoch. Die fusionierte Gaußglocke x' müsste tatsächlich breiter sein und/oder eine größere Überlappung mit den anderen Glocken haben. Zur Lösung dieses Problems kann das hier beschriebene Verfahren beitragen.

[0076] **Fig. 8** zeigt eine Veranschaulichung von Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen, die mit dem Ausführungsbeispiel aus **Fig. 4** realisiert werden können. Es ist zu erkennen, dass durch die Berücksichtigung der Diskrepanz D gemäß **Fig. 4** erreicht werden kann, dass die fusionierte Gaußglocke x' breiter ist und eine größere Überlappung mit den anderen Glocken hat. Dies erlaubt in vorteilhafter

Weise, dass sich der Umstand, dass eine nicht-plausible Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung (der Gaußglocken z und x ; vgl. **Fig. 7**) vorliegt nun auch in der fusionierten Gaußglocke x' niederschlägt.

[0077] **Fig. 9** zeigt eine Veranschaulichung von Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen, die mit dem Ausführungsbeispiel aus **Fig. 5** realisiert werden können. Es ist zu erkennen, dass durch die Berücksichtigung der Diskrepanz D gemäß **Fig. 5** erreicht werden kann, dass die fusionierte Gaußglocke x' eine größere Überlappung mit zumindest einer der anderen Glocken, hier der Gaußglocke x des Modells hat. Auch dies erlaubt in vorteilhafter Weise, dass sich der Umstand, dass eine nicht-plausible Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung (der Gaußglocken z und x ; vgl. **Fig. 7**) vorliegt nun auch in der fusionierten Gaußglocke x' niederschlägt.

[0078] Das hier beschriebene Verfahren sowie das hier beschriebene System erlauben insbesondere einen oder mehrere der folgenden Vorteile:

- Das Kalman-Filter ist vorteilhaft robuster gegenüber Störsignalen, Messfehlern, Modellungenauigkeiten und/oder anderen Auslegungsfehlern.
- Es können vorteilhaft Kosten bei der Parametrierung des Kalman-Filters gespart werden.
- Die Diskrepanzberechnung lässt sich vorteilhaft auch in den Erweiterungen des Kalman-Filters einfügen.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Ermitteln mindestens eines Systemzustands mittels eines Kalman-Filters, wobei dem Kalman-Filter mindestens ein von mindestens einem Sensor des Systems gemessener Messwert zugeführt wird, umfassend zumindest folgende Schritte:

- a) Durchführen einer Schätzung des Systemzustands mittels des Kalman-Filters, wobei ein Schätzergebnis und mindestens eine zugehörige Information über die Verlässlichkeit des Schätzergebnisses ausgegeben werden,
- b) Ermitteln einer Diskrepanz zwischen zumindest einem zu der Schätzung zugehörigen Modellwert und zumindest einem zu der Schätzung zugehörigen Messwert,
- c) Korrigieren mindestens einer Information über die Verlässlichkeit der Schätzung unter Verwendung der ermittelten Diskrepanz.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei es sich bei dem System um ein System zur Ermittlung der Position eines Fahrzeugs handelt.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei das Korrigieren gemäß Schritt c) kontinuierlich erfolgt.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Diskrepanz verwendet wird, um mindestens einen Konfidenzwert mindestens eines Modellwertes und/oder mindestens eines Messwerts des Kalman-Filters zu korrigieren.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Diskrepanz unter Verwendung folgender Elemente ermittelt wird:

- mindestens einem Modellwert,
- mindestens einem Messwert,
- mindestens einem fusionierten Modellwert, und
- mindestens einem Kalman-Gain oder alternativ zum Kalman-Gain mit
 - mindestens einer Kovarianz des mindestens einen Messwerts, und
 - mindestens einer Kovarianz des mindestens einen Modellwerts.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Einfluss der ermittelten Diskrepanz auf die mindestens eine Information über die Verlässlichkeit der Schätzung mittels mindestens einer Gewichtungsmatrix gewichtet wird.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die ermittelte Diskrepanz mittels eines Tiefpass-Filters gefiltert wird.

8. Computerprogramm zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche.

9. Maschinenlesbares Speichermedium, auf dem das Computerprogramm nach Anspruch 8 gespeichert ist.

10. System (1) zur Ermittlung der Position eines mobilen Objekts (2), eingerichtet zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 7.

Es folgen 6 Seiten Zeichnungen

Fig. 1

Stand der Technik

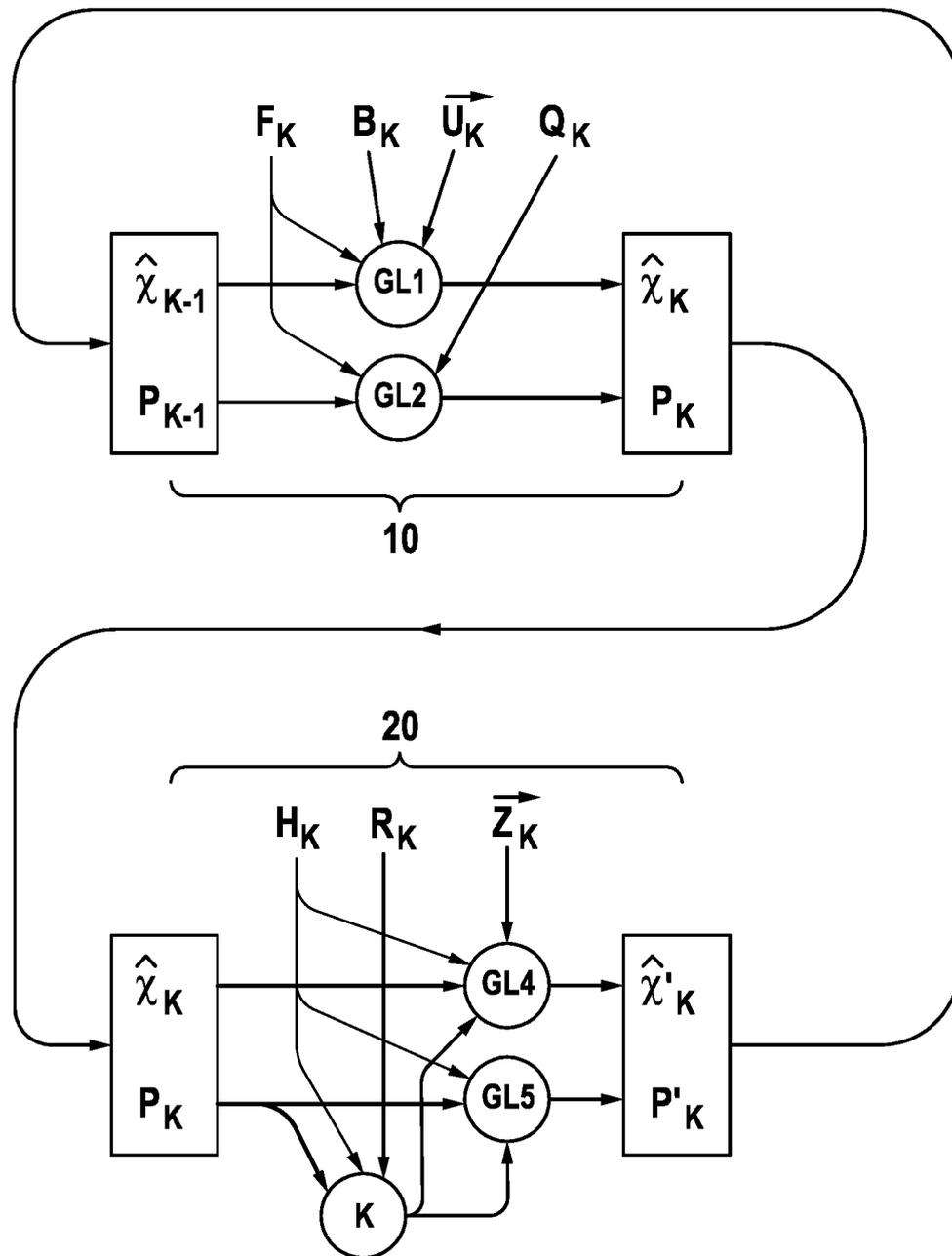


Fig. 2

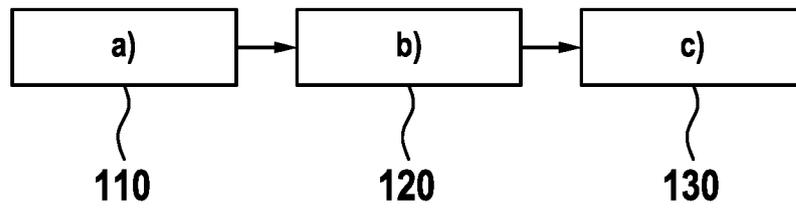


Fig. 3

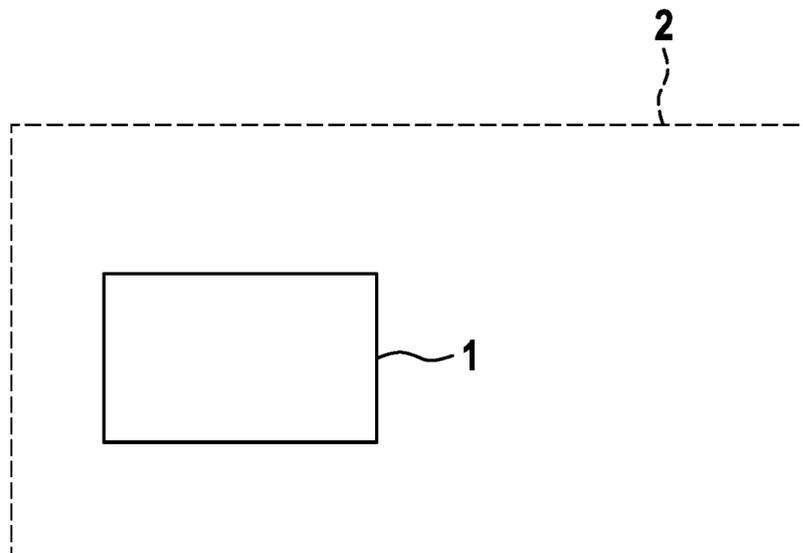


Fig. 4

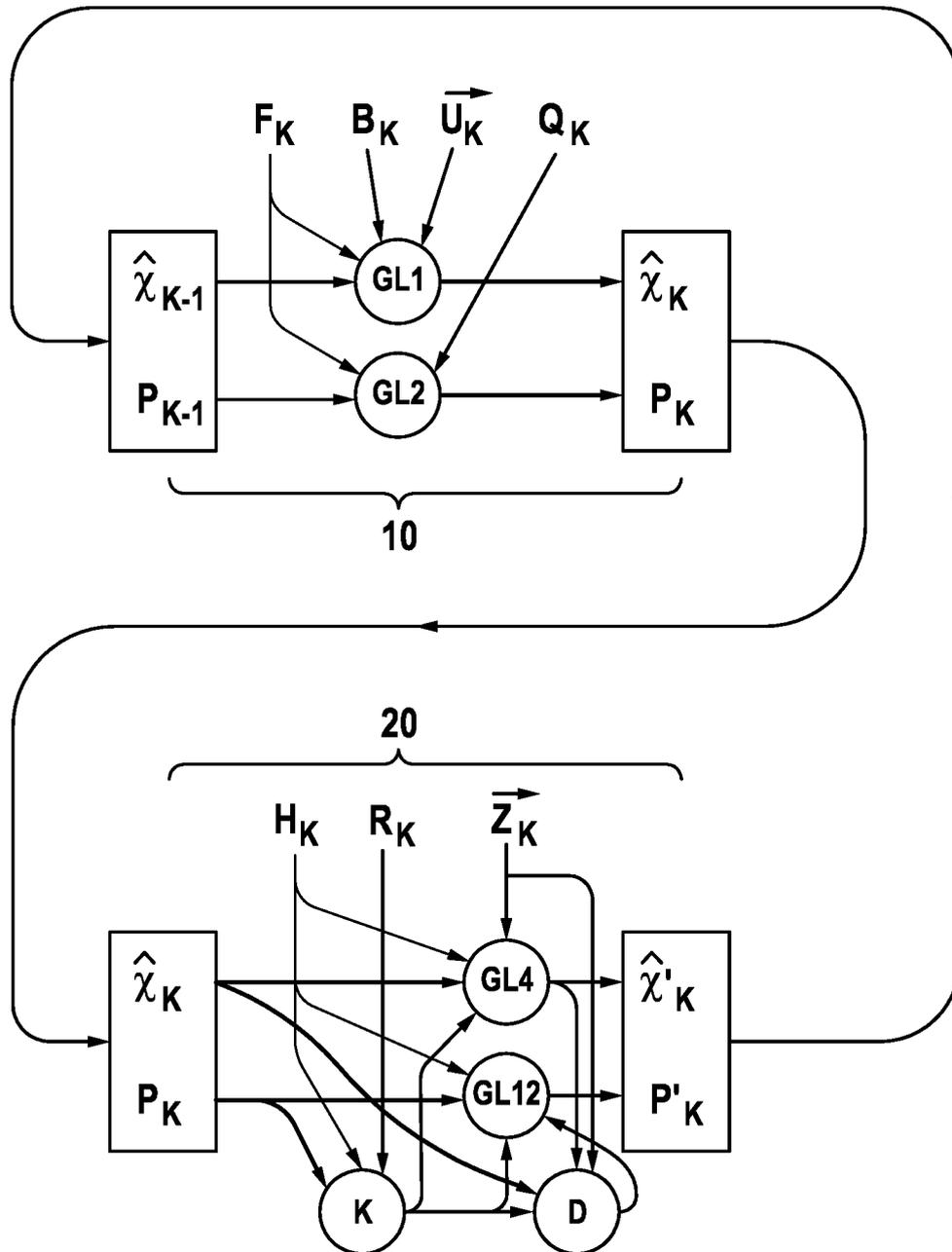


Fig. 5

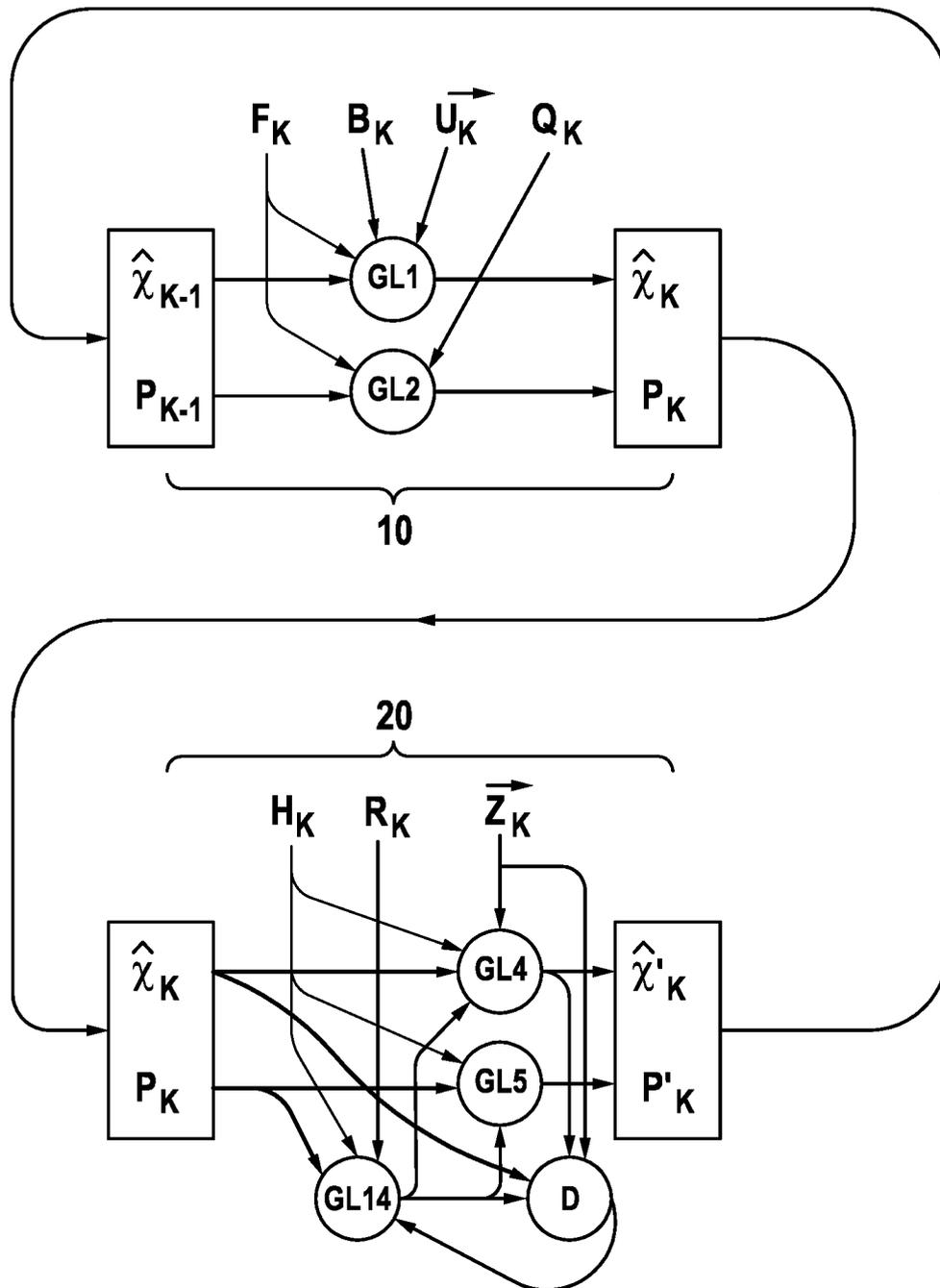


Fig. 6

Stand der Technik

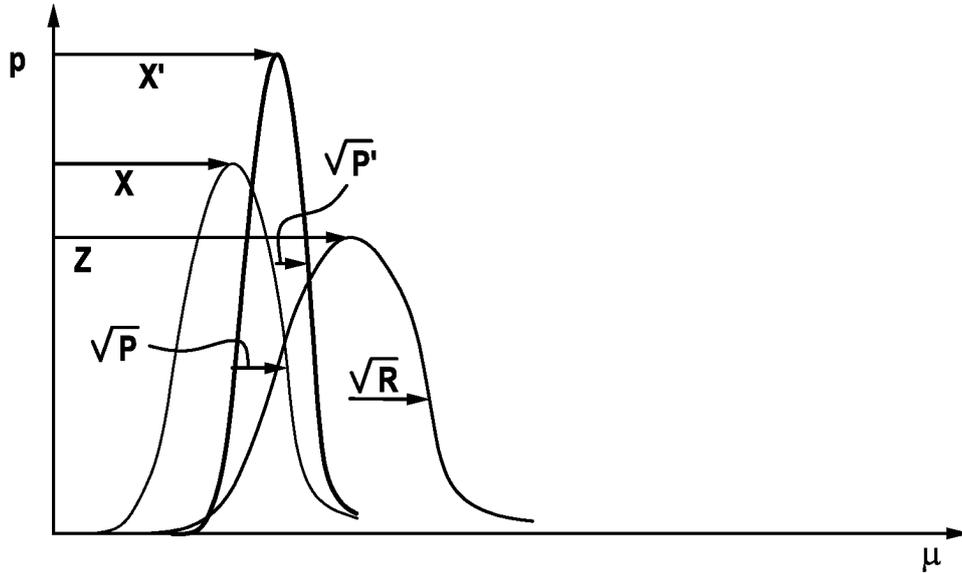


Fig. 7

Stand der Technik

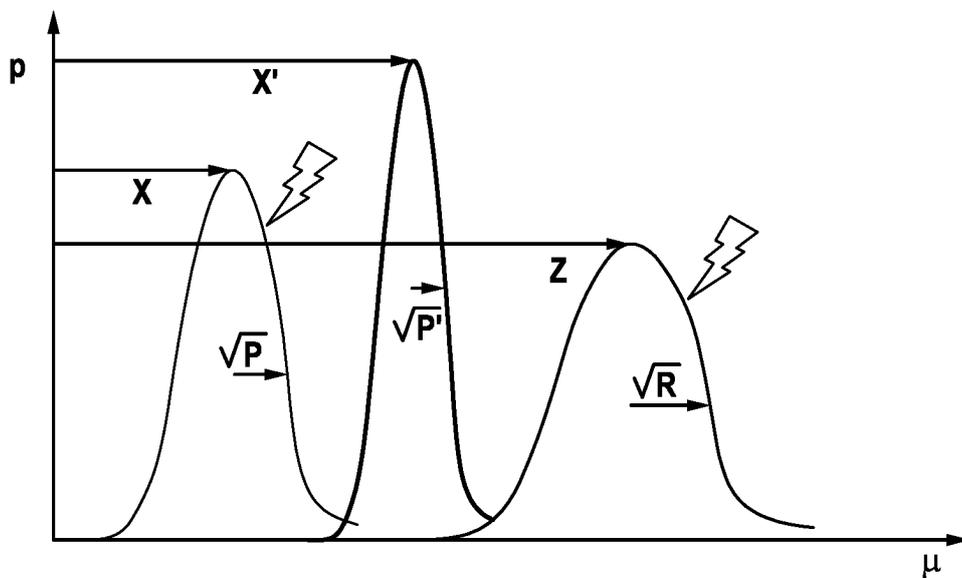


Fig. 8

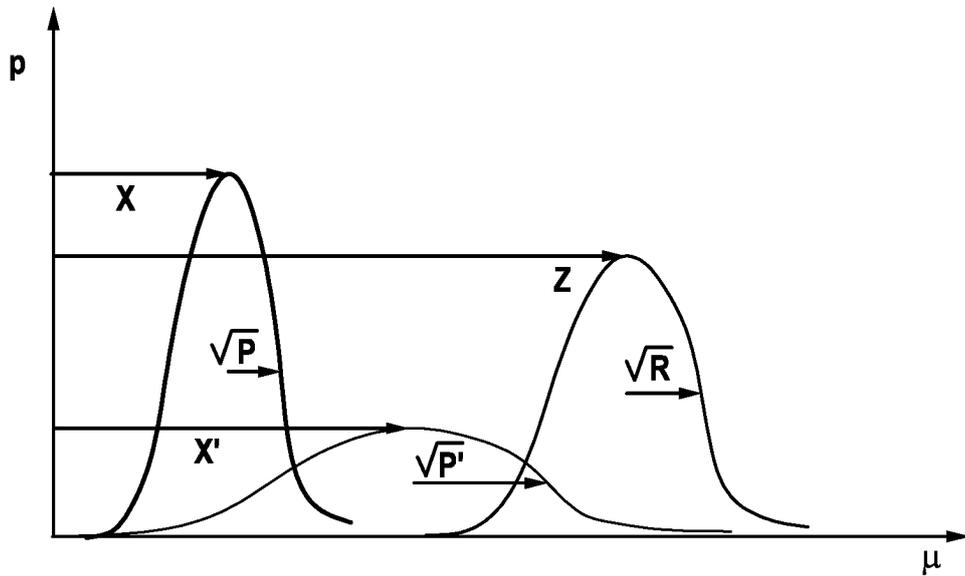


Fig. 9

