



(10) **DE 10 2020 132 425 A1** 2022.06.23

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2020 132 425.1**

(22) Anmeldetag: **07.12.2020**

(43) Offenlegungstag: **23.06.2022**

(51) Int Cl.: **G08C 13/00 (2006.01)**

H03K 19/003 (2006.01)

(71) Anmelder:

Infineon Technologies AG, 85579 Neubiberg, DE

(74) Vertreter:

**2SPL Patentanwälte PartG mbB Schuler Schacht
Platzer Lehmann, 81373 München, DE**

(72) Erfinder:

**Kollmitzer, Benjamin, Pörschach, AT; Granig,
Wolfgang, Seeboden, AT; Michenthaler, Christof,
Feistritz/Gail, AT; Motz, Mario, Wernberg, AT;
Slama, Peter, Klagenfurt, AT**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

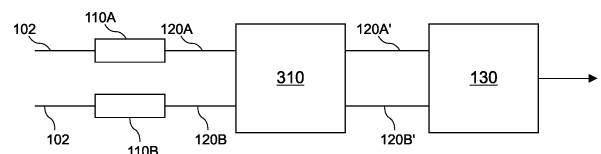
DE	10 2014 103 556	A1
DE	10 2015 111 686	A1
US	2017 / 0 163 405	A1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Vorrichtungen und Verfahren zum Vergleichen redundanter Signale in funktional sicheren Systemen**

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Offenlegung bezieht sich auf Verfahren und Vorrichtungen zum Vergleich redundanter Signale in funktionalen sicheren Systemen. Es werden Konzepte zur Abschwächung unterschiedlicher Signalpfadverzögerungen und zur Signalgewichtung der redundanten Signale vorgeschlagen.



Beschreibung

Gebiet

[0001] Die vorliegende Offenbarung bezieht sich allgemein auf funktional sichere Anwendungen und insbesondere auf Verfahren und Vorrichtungen zum Vergleichen redundanter Signale in funktional sicheren Systemen, wie z. B. Sensorsystemen.

Hintergrund

[0002] Verschiedene Sensoren, wie z.B. Positionssensoren, liefern ihr Messausgangssignal über eine analoge oder digitale Sensorschnittstelle. Die interne Signalverarbeitung integrierter Sensorsysteme kann jedoch die erfassten Signale und die Zeitgebung beeinflussen.

[0003] Sicherheitsmechanismen für den Signalvergleich bieten einen hervorragenden Diagnosedeckungsgrad (Diagnostic Coverage) für Anwendungen, die funktionale Sicherheit erfordern, insbesondere bei Verwendung unterschiedlicher Signalpfade. Außerdem sind solche Sicherheitsmechanismen in der Regel einfach zu implementieren, da nur die Differenz zweier Signale mit bestimmten Grenzen verglichen werden muss.

[0004] Im Allgemeinen können verschiedene Signalpfade aufgrund von Entwurfseinschränkungen unterschiedliche Signallatenzen erzeugen. Bei Hochgeschwindigkeitsanwendungen, bei denen sich die Signale in Abhängigkeit von der Zeit schnell ändern, können moderne Signalvergleichsmechanismen leicht zu Fehlalarmen und Verfügbarkeitsverlust führen.

[0005] Daher kann es bei funktional sicheren Anwendungen erforderlich sein, unterschiedliche Signallatenzen verschiedener (redundanter) Signalpfade zu kompensieren.

Zusammenfassung

[0006] Dieser Bedarf wird durch Vorrichtungen und Verfahren gemäß den unabhängigen Ansprüchen erfüllt. Einige vorteilhafte Ausführungsbeispiele werden durch die abhängigen Ansprüche angesprochen.

[0007] Gemäß einem ersten Aspekt schlägt die vorliegende Offenbarung eine Vorrichtung zum Vergleichen eines ersten Signals und eines zweiten Signals vor. Die Vorrichtung umfasst einen ersten Signalpfad für ein erstes Messsignal einer physikalischen Größe. Der erste Signalpfad hat eine erste Signallaufzeitverzögerung. Die Vorrichtung umfasst außerdem einen zweiten Signalpfad für ein zweites Messsignal der (gleichen) physikalischen Größe. Der zweite Signalpfad hat eine zweite Signallaufzeitverzögerung, die sich von der ersten Signallaufzeitverzögerung unterscheidet. Die Vorrichtung umfasst ferner eine Verzögerungskompensationsschaltung, die so ausgebildet ist, dass sie eine Differenz zwischen der ersten und der zweiten Signalausbreitungsverzögerung kompensiert, um ein verzögerungskompensiertes erstes und zweites Messsignal zu erzeugen. Die Vorrichtung umfasst ferner eine Vergleichsschaltung, die so ausgebildet ist, dass sie das verzögerungskompensierte erste und zweite Messsignal vergleicht. Die Verzögerungskompensationsschaltung kann das erste und das zweite Messsignal zeitlich angleichen, um ihre Vergleichbarkeit zu verbessern. So können Ausführungsbeispiele der vorliegenden Offenbarung Fehlalarme und Verfügbarkeitsverluste in funktionalen sicheren Hochgeschwindigkeitssystemen verringern.

[0008] Bei einigen Ausführungsbeispielen umfassen der erste und der zweite Signalpfad entsprechende Sensorelemente, die so ausgebildet sind, dass sie die physikalische Größe in das erste und das zweite Messsignal umwandeln. Die jeweiligen Sensorelemente und/oder die jeweiligen weiteren Schaltungskomponenten des ersten und des zweiten Signalpfades verursachen die jeweiligen unterschiedlichen Signallaufzeitverzögerungen. Außerdem können der erste und der zweite Signalpfad unterschiedliche Abtastzeiten haben. Dies kann zu unterschiedlichen Zeitgebungen zwischen dem ersten und dem zweiten Signalpfad führen.

[0009] Bei einigen Ausführungsbeispielen ist die Verzögerungskompensationsschaltung so ausgebildet, dass sie eine erste Signalverarbeitung des ersten Signalpfades und eine zweite Signalverarbeitung des zweiten Signalpfades zu unterschiedlichen Zeitpunkten auslöst, um das verzögerungskompensierten erste und zweite Messsignal an den jeweiligen Ausgängen des ersten und des zweiten Signalpfades zu erhalten. Das heißt, die jeweilige Signalverarbeitung der verschiedenen Signalpfade kann unterschiedlich ausgelöst wer-

den, um im Wesentlichen zeitlich ausgerichtete Ausgangssignale zu erzeugen, die verglichen werden können.

[0010] Bei einigen Ausführungsbeispielen basiert eine Differenz zwischen einer ersten Auslösezeit für den ersten Signalpfad und einer zweiten Auslösezeit für den zweiten Signalpfad auf einer Differenz zwischen der ersten und der zweiten Signallaufzeitverzögerung und/oder unterschiedlichen Abtastperioden, die im ersten und zweiten Signalpfad verwendet werden.

[0011] Bei einigen Ausführungsbeispielen ist die Verzögerungskompensationsschaltung so ausgebildet, dass sie den ersten Signalpfad früher auslöst als den zweiten Signalpfad, wenn die erste Signallaufzeitverzögerung länger ist als die zweite Signallaufzeit, oder umgekehrt.

[0012] Bei einigen Ausführungsbeispielen umfasst die Verzögerungskompensationsschaltung eine Filterschaltung, die so ausgebildet ist, dass sie ein gefiltertes Messsignal für mindestens einen des ersten oder zweiten Signalpfades erzeugt, wobei das gefilterte Messsignal mit dem Messsignal des anderen Signalpfades zeitlich ausgerichtet ist. Das heißt, alternativ oder zusätzlich zu unterschiedlichen Auslösezeiten können Filterverzögerungen verwendet werden, um ein zeitlich ausgerichtetes erstes und zweites Messsignal für den Vergleich zu erzeugen.

[0013] Bei einigen Ausführungsbeispielen umfasst die Filterschaltung im ersten oder zweiten Signalpfad ein FIR-Filter (Finite Impulse Response) mit einer Filterverzögerung (delay; Verzögerung), die einer Differenz zwischen der ersten und der zweiten Signallaufzeit entspricht. Das FIR-Filter kann in den Signalpfad mit der kürzeren Signallaufzeitverzögerung integriert werden. Auf diese Weise kann die kürzere Signallaufzeitverzögerung plus die Filterverzögerung der längeren Signallaufzeitverzögerung entsprechen und zu einem zeitlich abgestimmten ersten und zweiten Messsignal zum Vergleich führen.

[0014] Bei einigen Ausführungsbeispielen umfasst die Filterschaltung ein erstes FIR-Filter im ersten Signalpfad und ein zweites FIR-Filter im zweiten Signalpfad. Die Summe der ersten Ausbreitungsverzögerung und einer ersten Filterverzögerung des ersten FIR-Filters ist gleich der Summe der zweiten Ausbreitungsverzögerung und einer zweiten Filterverzögerung des zweiten FIR-Filters. Dies ist eine weitere Option, um ein zeitlich abgestimmtes erstes und zweites Messsignal zum Vergleich zu erhalten.

[0015] Bei einigen Ausführungsbeispielen umfasst die Filterschaltung im ersten oder zweiten Signalweg ein Vorhersagefilter (prediction filter) mit einem Vorhersagezeitintervall, das einer Differenz zwischen der ersten und der zweiten Signallaufzeitverzögerung entspricht. Das Vorhersagefilter kann in dem Signalpfad mit der längeren Signallaufzeitverzögerung umfasst sein, um einen Wert vorherzusagen, der mit dem Signalpfad mit der kürzeren Signallaufzeitverzögerung zeitlich abgestimmt ist.

[0016] Bei einigen Ausführungsbeispielen umfasst die Filterschaltung ein erstes Vorhersage-Filter im ersten Signalpfad und ein zweites Vorhersage-Filter im zweiten Signalpfad. Die Summe der ersten Ausbreitungsverzögerung und eines ersten Vorhersagezeitintervalls des ersten Vorhersage-Filters ist gleich der Summe der zweiten Ausbreitungsverzögerung und eines zweiten Vorhersagezeitintervalls des zweiten Vorhersage-Filters. Dies ist eine weitere Option, um ein zeitlich abgestimmtes erstes und zweites Messsignal zum Vergleich zu erhalten.

[0017] Bei einigen Ausführungsbeispielen umfasst das Vorhersagefilter ein Kalman-Filter. Ein Kalman-Filter arbeitet in einem zweistufigen Prozess. In einem Vorhersageschritt erzeugt das Kalman-Filter Schätzungen der aktuellen Zustandsvariablen zusammen mit ihren Unsicherheiten. Sobald das Ergebnis einer nächsten Messung (die mit einem gewissen Fehler, einschließlich zufälligem Rauschen, behaftet ist) beobachtet wird, werden diese Schätzungen anhand eines gewichteten Durchschnitts aktualisiert, wobei Schätzungen mit höherer Sicherheit mehr Gewicht erhalten. Der Algorithmus ist rekursiv. Er kann in Echtzeit ausgeführt werden, wobei nur die aktuellen Eingangsmessungen und der zuvor berechnete Zustand und seine Unsicherheitsmatrix verwendet werden; zusätzliche Informationen aus der Vergangenheit sind nicht erforderlich.

[0018] Bei einigen Ausführungsbeispielen ist die Vergleichsschaltung so ausgebildet, dass sie einen Sicherheitsalarm auslöst, wenn das verzögerungskompensierte (oder zeitlich abgestimmte) erste und zweite Messsignal um mehr als einen vordefinierten Schwellenwert voneinander abweichen, da dies ein Indikator dafür sein kann, dass einer der Signalpfade nicht ordnungsgemäß funktioniert.

[0019] Bei einigen Ausführungsbeispielen kann die Vorrichtung ferner eine Schnittstelle umfassen, die so ausgebildet ist, dass sie das verzögerungskompensierte (zeitlich abgestimmte) erste Messsignal von einem ersten Sensor gemäß einer ersten Sensortechnologie empfängt und das verzögerungskompensierte (zeitlich abgestimmte) zweite Messsignal von einem zweiten Sensor gemäß einer zweiten Sensortechnologie empfängt. Die Vorrichtung kann ferner einen Prozessor umfassen, der so ausgebildet ist, dass er eine Schätzung der physikalischen Größe auf der Grundlage einer Kombination des verzögerungskompensierten ersten und zweiten Messsignals berechnet, wobei die Kombination von einer erwarteten Genauigkeit des ersten und des zweiten Sensors abhängig ist.

[0020] Bei der ersten Sensortechnologie kann es sich zum Beispiel um eine magnetoresistive Sensortechnologie handeln. Bekannte magnetoresistive Sensortechnologien sind der anisotrope Magnetowiderstand (AMR), der Riesenmagnetowiderstand (GMR), der Tunnelmagnetowiderstand (TMR), der kolossale Magnetowiderstand (CMR) oder der außergewöhnliche Magnetowiderstand (EMR). Sie lassen sich unter dem Begriff xMR zusammenfassen. Die zweite Sensortechnologie kann darauf beruhen, dass der Hall-Effekt eine Spannungsdifferenz (Hall-Spannung) über einen elektrischen Leiter erzeugt, die quer zu einem elektrischen Strom in dem Leiter und zu einem angelegten Magnetfeldsenkrecht zu dem Strom verläuft.

[0021] Ähnlich wie die xMR-Sensoren sind vertikale Hall- (Vhall-) Sensoren in der Lage, oberflächenparallele oder in der Ebene liegende Komponenten des Magnetfelds zu messen. Automatisch kalibrierte xMR-basierte Winkelsensoren weisen beim Start und bei sehr langsamen Drehungen eine suboptimale Genauigkeit auf. VHall-basierte Winkelsensoren leiden unter der begrenzten Genauigkeit bei mittleren und sehr schnellen Drehungen. So ermöglichen es Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung, die Vorteile beider Technologien zu nutzen:

- gute Genauigkeit unmittelbar nach dem Start, bei langsamen Winkelgeschwindigkeiten und bei Start-/Stopp-Anwendungen und
- gutes Signal-Rausch-Verhältnis und ausgezeichnete Phasenstabilität für xMR, was zu einer ausgezeichneten Genauigkeit bei mittleren und schnellen Winkelgeschwindigkeiten führt.

[0022] Bei einigen Ausführungsbeispielen ist der Prozessor so ausgebildet, dass er das erste und das zweite Messsignal in Abhängigkeit von einer aktuellen Änderungsrate der physikalischen Größe (z. B. des Winkels) und/oder von einem jeweiligen Status (z. B. Autokalibrierung ein/aus) des ersten und des zweiten Sensors kombiniert.

[0023] Gemäß einem weiteren Aspekt schlägt die vorliegende Offenbarung ein Verfahren zum Vergleichen eines ersten Signals und eines zweiten Signals vor. Das Verfahren umfasst das Bereitstellen eines ersten Messsignals einer physikalischen Größe über einen ersten Signalpfad mit einer ersten Signalausbreitungsverzögerung, das Bereitstellen eines zweiten Messsignals der physikalischen Größe über einen zweiten Signalpfad mit einer ersten Signalausbreitungsverzögerung, die sich von der ersten Signalausbreitungsverzögerung unterscheidet, das Kompensieren einer Differenz zwischen der ersten und der zweiten Signalausbreitungsverzögerung, um ein verzögerungskompensiertes erstes und zweites Messsignal zu erzeugen, und das Vergleichen des verzögerungskompensierten ersten und zweiten Messsignals.

[0024] Gemäß einem weiteren Aspekt der vorliegenden Offenbarung wird eine Vorrichtung zum Erfassen einer physikalischen Größe vorgeschlagen. Die Vorrichtung umfasst eine Schnittstelle, die so ausgebildet ist, dass sie ein erstes Messsignal der physikalischen Größe von einem ersten Sensor gemäß einer ersten Sensortechnologie empfängt und mindestens ein zweites Messsignal der physikalischen Größe von einem zweiten Sensor gemäß einer zweiten Sensortechnologie empfängt. Die Vorrichtung umfasst ferner einen Prozessor, der so ausgebildet ist, dass er eine Schätzung der physikalischen Größe auf der Grundlage einer Kombination aus dem ersten und dem zweiten Messsignal berechnet. Die Kombination hängt von der erwarteten Genauigkeit des ersten und des zweiten Sensors ab. So ermöglichen es Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung, die Vorteile beider Sensortechnologien zu kombinieren.

[0025] Bei einigen Ausführungsbeispielen ist das erste Messsignal ein erstes Winkelmesssignal von einem ersten Winkelsensor in Übereinstimmung mit einer ersten Winkelsensortechnologie.

[0026] Das zweite Messsignal ist ein zweites Winkelmesssignal von einem zweiten Winkelsensor in Übereinstimmung mit einer zweiten Winkelsensortechnologie. Der erste Winkelsensor umfasst beispielsweise einen xMR-Winkelsensor und der zweite Winkelsensor umfasst einen VHall-Sensor. VHall-Sensoren haben eine gute Genauigkeit direkt nach dem Start, für langsame Winkelgeschwindigkeiten und für Start/Stopp-Anwen-

dungen. xMR-Winkelsensoren haben ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis und eine ausgezeichnete Phasens stabilität für xMR, was zu einer hervorragenden Genauigkeit bei mittleren und schnellen Winkelgeschwindigkeiten führt.

[0027] Bei einigen Ausführungsbeispielen ist der Prozessor so ausgebildet, dass er das erste und das zweite Winkelmesssignal in Abhängigkeit von einer aktuellen Winkelgeschwindigkeit und/oder von einem jeweiligen Status (z. B. Autokalibrierung ein/aus) des ersten und des zweiten Winkelsensors kombiniert.

[0028] Bei einigen Ausführungsbeispielen ist der Prozessor so ausgebildet, dass er mit zunehmender Winkelgeschwindigkeit eine (rechnerische) Gewichtung des ersten Winkelmesssignals gegenüber dem zweiten Winkelmesssignal erhöht. Dies kann von Vorteil sein, um einem xMR-Sensor mehr Gewicht zu verleihen, wenn die Winkelgeschwindigkeit zunimmt. Der Prozessor kann so ausgebildet sein, dass das Gewicht des zweiten Winkelmesssignals gegenüber dem ersten Winkelmesssignal mit abnehmender Winkelgeschwindigkeit zunimmt. Dies kann von Vorteil sein, um z. B. einem VHall-Sensor mehr Gewicht zu verleihen, wenn die Winkelgeschwindigkeit abnimmt.

[0029] Bei einigen Ausführungsbeispielen ist der Prozessor so ausgebildet, dass er das Messsignal mit der besten erwarteten Genauigkeit als Schätzung ausgibt. Dabei kann die Kombination der Messsignale binärer Natur sein. Falls eine bessere Genauigkeit des ersten Messsignals erwartet wird, kann das erste Messsignal mit 1 gewichtet werden, während das zweite Messsignal mit 0 gewichtet werden kann. Falls eine bessere Genauigkeit des zweiten Messsignals erwartet wird, kann das zweite Messsignal mit 1 gewichtet werden, während das erste Messsignal mit 0 gewichtet werden kann.

[0030] Bei einigen Ausführungsbeispielen ist die erwartete Genauigkeit des magnetoresistiven Winkelsensors von einem Autokalibrierungsaktivierungsstatus des magnetoresistiven Winkelsensors abhängig und die erwartete Genauigkeit des vertikalen Hallsensors ist von einer aktuellen Winkelgeschwindigkeit abhängig. Wenn die Autokalibrierung aktiv ist, kann beispielsweise die erwartete Genauigkeit des xMR-Sensors höher sein, andernfalls kann die erwartete Genauigkeit des VHall-Sensors höher sein. Liegt die aktuelle Winkelgeschwindigkeit unter einem bestimmten Schwellenwert, kann die erwartete Genauigkeit des VHall-Sensors höher sein als die des xMR-Sensors, andernfalls kann die erwartete Genauigkeit des xMR-Sensors höher sein.

[0031] Für die Autokalibrierung kann ein erster Versatzwert einer ersten Sensorsignalkomponente (z. B. $\cos(\varphi)$) für eine Drehung eines Messobjekts bestimmt werden. Ebenso kann ein zweiter Versatzwert einer zweiten Sensorsignalkomponente (z. B. $\sin(\varphi)$) für die Drehung des Messobjekts bestimmt werden. Ein Amplitudenkorrekturwert kann auf der Grundlage der Signalamplituden der ersten und der zweiten Sensorsignalkomponente bestimmt werden. Der erste bestimmte Versatzwert, der zweite bestimmte Versatzwert und der bestimmte Amplitudenkorrekturwert können dann für die Korrektur einer Drehwinkelschätzung in einem Betriebsmodus des Winkelsensors verwendet werden.

[0032] Bei einigen Ausführungsbeispielen umfasst der Prozessor ein Kalman-Filter, das so ausgebildet ist, dass es die Schätzung unter Verwendung des ersten und des zweiten Messsignals berechnet, die durch entsprechende Messfehler verfälscht sind.

[0033] Bei einigen Ausführungsbeispielen umfasst die Vorrichtung zum Erfassen einer physikalischen Größe ferner eine Vergleichsschaltung, die so ausgebildet ist, dass sie das erste und das zweite Messsignal der verschiedenen Sensortechnologien vergleicht und auf der Grundlage des Vergleichs einen Indikator für funktionale Sicherheit ausgibt. Weichen sie zu stark voneinander ab, kann eine Sicherheitsmaßnahme eingeleitet werden.

[0034] Bei einigen Ausführungsbeispielen umfasst die Vorrichtung zum Erfassen einer physikalischen Größe außerdem einen ersten Signalpfad für das erste Messsignal. Der erste Signalpfad hat eine erste Signallaufzeitverzögerung. Die Vorrichtung umfasst außerdem einen zweiten Signalpfad für das zweite Messsignal. Der zweite Signalpfad hat eine zweite Signallaufzeitverzögerung, die sich von der ersten Signallaufzeitverzögerung unterscheidet. Die Vorrichtung umfasst ferner eine Verzögerungskompensationsschaltung, die so ausgebildet ist, dass sie eine Differenz zwischen der ersten und der zweiten Signalausbreitungsverzögerung kompensiert, um ein verzögerungskompensiertes (oder zeitausgerichtetes) erstes und zweites Messsignal zu erzeugen. Der Prozessor ist so ausgebildet, dass er die Schätzung auf der Grundlage einer Kombination aus dem verzögerungskompensierten ersten und zweiten Messsignal berechnet. Auf diese Weise können Unge-

naugigkeiten aufgrund unterschiedlicher Signalverarbeitungsverzögerungen /Abtastzeiten abgeschwächt werden.

[0035] Bei einigen Ausführungsbeispielen ist die Verzögerungskompensationsschaltung so ausgebildet, dass sie eine erste Signalverarbeitung des ersten Signalpfades und eine zweite Signalverarbeitung des zweiten Signalpfades zu unterschiedlichen Zeitpunkten auslöst, um das verzögerungskompensierte (zeit-ausgerichtete) erste und zweite Messsignal an den jeweiligen Ausgängen des ersten und des zweiten Signalpfades zu erhalten.

[0036] Bei einigen Ausführungsbeispielen umfasst die Verzögerungskompensationsschaltung eine Filterschaltung, die so ausgebildet ist, dass sie ein gefiltertes Messsignal für mindestens einen des ersten oder zweiten Signalpfades erzeugt, wobei das gefilterte Winkelmesssignal mit dem Messsignal des anderen Signalpfades zeitlich ausgerichtet ist.

[0037] Gemäß einem weiteren Aspekt der vorliegenden Offenbarung wird ein Verfahren zum Erfassen einer physikalischen Größe vorgeschlagen. Das Verfahren umfasst das Empfangen eines ersten Messsignals der physikalischen Größe von einem ersten Sensor in Übereinstimmung mit einer ersten Sensortechnologie, das Empfangen mindestens eines zweiten Messsignals der physikalischen Größe von einem zweiten Sensor in Übereinstimmung mit einer zweiten Sensortechnologie und das Berechnen einer Schätzung der physikalischen Größe auf der Grundlage einer Kombination des ersten und des zweiten Messsignals, wobei die Kombination von einer erwarteten Genauigkeit des ersten und des zweiten Sensors abhängig ist.

[0038] Ausführungsbeispiele der vorliegenden Offenbarung können funktionale sichere Systeme, wie z. B. Sensorsysteme, in Bezug auf Genauigkeit und Sicherheit verbessern.

Figurenliste

[0039] Nachfolgend werden einige Beispiele von Vorrichtungen und/oder Verfahren ausschließlich beispielhaft und Bezug nehmend auf die beiliegenden Figuren beschrieben, in denen gilt:

Fig. 1A zeigt ein Konzept für den Signalvergleich bei planmäßigem (synchronem) Betrieb, bei dem eine Quelle beide Signalpfade auslöst;

Fig. 1B zeigt ein Konzept für den Signalvergleich bei asynchronem Betrieb, bei dem die Auslöserquellen für beide Signalpfade asynchron arbeiten;

Fig. 1C zeigt eine typische Signalpfadarchitektur;

Fig. 2A zeigt den zeitlichen Ablauf (Zeitgebung) eines Signalpfades;

Fig. 2B zeigt einen Sensorfehler, der durch Verarbeitungsverzögerung, Filterverzögerung und Abtastung verursacht wird;

Fig. 2C zeigt die Sensorausgänge von zwei verschiedenen Sensordatenpfaden mit unterschiedlicher Verzögerung und Abtastung;

Fig. 2D zeigt einen Fehler zwischen den Sensorausgängen von zwei verschiedenen Sensordatenpfaden;

Fig. 3 zeigt ein Blockdiagramm einer Vorrichtung zum Vergleich eines ersten Signals und eines zweiten Signals gemäß den Ausführungsbeispielen der vorliegenden Offenbarung;

Fig. 4A, B zeigen Konzepte für Hochgeschwindigkeits-Signalvergleichsschaltungen, die sich für einen planmäßigen Betrieb eignen;

Fig. 5A zeigt ein Konzept für Hochgeschwindigkeits-Signalvergleichsschaltungen, die für asynchronen Betrieb geeignet sind;

Fig. 5B zeigt ein Finite-Impulsantwort-Filter (FIR-Filter; Finite Impulse Response) zum zusätzlichen Einfügen einer definierten Signalverzögerung in jeden Kanal;

Fig. 6A, B zeigen Konzepte für die Synchronisierung eines Kanals mit hoher Bandbreite mit einem Kanal mit niedriger Bandbreite in Übereinstimmung mit den Ausführungsbeispielen;

Fig. 7A, B zeigen eine Anpassung einer Verzögerungsdifferenz zwischen den beiden Erfassungskanälen durch Signalvorhersage des langsamen Kanals an den schnellen Kanal, die durch Vorhersage von

Signalen des langsamen Kanals a erfolgen kann, um die Verzögerung des Kanals mit hoher Bandbreite mit der des Kanals mit niedriger Bandbreite zu synchronisieren;

Fig. 7C zeigt ein Blockdiagramm eines Kalman-Filters;

Fig. 8A, B zeigen Konzepte zur Implementierung eines Filters oder einer Vorhersage auf beiden Kanälen mit angepasster Verzögerung, um eine verbleibende Signalbandbreite und Verzögerungsdifferenz zu kompensieren;

Fig. 9 zeigt ein Konzept zur Implementierung eines Filters oder einer Vorhersage auf beiden Kanälen mit angepasster Verzögerung, um die verbleibende Signalbandbreite und Verzögerungsdifferenz zu kompensieren;

Fig. 10 zeigt ein Konzept-Blockdiagramm zum Erhalten optimaler Winkelschätzer aus einem Sensor, der xMR- und VHall-basierte Sensortechnologien kombiniert;

Fig. 11 zeigt ein Blockdiagramm für die binäre Signalgewichtung, wobei auf der Grundlage der geschätzten Winkelgenauigkeit entweder `angle_xMR` oder `angle_VHall` ausgegeben werden; und

Fig. 12 zeigt ein Blockdiagramm für eine erweiterte Signalgewichtung unter Verwendung eines Kalman-Filters, um den optimal möglichen Winkelschätzer zu erhalten.

Detaillierte Beschreibung

[0040] Verschiedene Beispiele werden nun ausführlicher Bezug nehmend auf die beiliegenden Zeichnungen beschrieben, in denen einige Beispiele dargestellt sind. In den Figuren können die Stärken von Linien, Schichten und/oder Regionen der Klarheit halber übertrieben dargestellt sein.

[0041] Entsprechend sind, obgleich weitere Beispiele zu verschiedenen Modifikationen und alternativen Formen in der Lage sind, manche bestimmten Beispiele davon in den Figuren gezeigt und werden anschließend ausführlich beschrieben. Allerdings beschränkt diese detaillierte Beschreibung weitere Beispiele nicht auf die beschriebenen bestimmten Formen. Weitere Beispiele können alle Modifikationen, Entsprechungen und Alternativen abdecken, die in den Schutzbereich der Offenbarung fallen. Gleiche oder ähnliche Bezugszeichen beziehen sich in der gesamten Beschreibung der Figuren auf gleiche oder ähnliche Elemente, die bei einem Vergleich miteinander identisch oder in modifizierter Form implementiert sein können, während sie die gleiche oder eine ähnliche Funktion bereitstellen.

[0042] Es versteht sich, dass, wenn ein Element als mit einem anderen Element „verbunden“ oder „gekoppelt“ bezeichnet wird, die Elemente direkt, oder über ein oder mehrere Zwischenelemente verbunden oder gekoppelt sein können. Wenn zwei Elemente A und B unter Verwendung eines „oder“ kombiniert werden, ist dies so zu verstehen, dass alle möglichen Kombinationen offenbart sind, d. h. nur A, nur B sowie A und B, sofern dies nicht explizit oder implizit anderweitig angegeben ist. Eine alternative Formulierung für die gleichen Kombinationen ist „zumindest eines von A und B“ oder „A und/oder B“. Das Gleiche gilt, mutatis mutandis, für Kombinationen von mehr als zwei Elementen.

[0043] Die Terminologie, die hierin zu dem Zweck des Beschreibens bestimmter Beispiele verwendet wird, soll nicht begrenzend für weitere Beispiele sein. Wenn eine Singularform, z. B. „ein, eine“ und „der, die, das“ verwendet wird und die Verwendung nur eines einzelnen Elements weder explizit noch implizit als verpflichtend definiert ist, können weitere Beispiele auch Pluralelemente verwenden, um die gleiche Funktion zu implementieren. Ähnlich, wenn eine Funktionalität nachfolgend als unter Verwendung mehrerer Elemente implementiert beschrieben ist, können weitere Beispiele die gleiche Funktionalität unter Verwendung eines einzelnen Elements oder einer einzelnen Verarbeitungsentität implementieren. Es versteht sich weiterhin, dass die Begriffe „umfasst“, „umfassend“, „aufweist“ und/oder „aufweisend“ bei Gebrauch das Vorhandensein der angegebenen Merkmale, Ganzzahlen, Schritte, Operationen, Prozesse, Handlungen, Elemente und/oder Komponenten präzisieren, aber nicht das Vorhandensein oder das Hinzufügen eines oder mehrerer anderer Merkmale, Ganzzahlen, Schritte, Operationen, Prozesse, Handlungen, Elemente, Komponenten und/oder einer Gruppe derselben ausschließen.

[0044] Sofern nicht anderweitig definiert, werden alle Begriffe (einschließlich technischer und wissenschaftlicher Begriffe) hierin in ihrer üblichen Bedeutung des Gebiets verwendet, zu dem die Beispiele gehören.

[0045] Sicherheitsmechanismen für den Signalvergleich können einen hervorragenden Diagnosedeckungsgrad (Diagnostic Coverage) für Anwendungen bieten, die funktionale Sicherheit erfordern, insbesondere bei

Verwendung unterschiedlicher (redundanter) Signalpfade. Solche Sicherheitsmechanismen sind in der Regel einfach zu implementieren, da nur die Differenz zweier Signale mit bestimmten Grenzen verglichen werden muss. Zwei herkömmliche Konzepte für den Signalvergleich sind in den **Fig. 1A** und **Fig. 1B** dargestellt.

[0046] **Fig. 1A, Fig. 1B** zeigen jeweils einen ersten Signalpfad 110A für ein erstes Messsignal 120A einer physikalischen Größe 102. Der erste Signalpfad 110A hat eine erste Signallaufzeitverzögerung t_{ca} . **Fig. 1A, Fig. 1B** zeigen jeweils auch einen (redundanten) zweiten Signalpfad 110B für ein zweites Messsignal 120B der gleichen physikalischen Größe 102. Der zweite Signalpfad 110B hat eine zweite Signallaufzeitverzögerung t_{cb} , die sich von der ersten Signallaufzeitverzögerung t_{ca} unterscheidet. Eine Vergleichsschaltung 130 ist so ausgebildet, dass sie das erste und zweite Messsignal 120A, 120B im Hinblick auf die funktionale Sicherheit vergleicht. Während in **Fig. 1A** eine Auslöselogik 140 beide Signalpfade 110A, 110B synchron auslöst, löst eine Auslöselogik 140' aus **Fig. 1B** die Signalpfade 110A, 110B asynchron aus.

[0047] Gemäß Ausführungsformen können der erste und der zweite Signalpfad 110A, 110B entsprechende Sensorelemente und weitere entsprechende elektrische Schaltungskomponenten umfassen, die zur Umwandlung der physikalischen Größe 102 in das erste und das zweite Messsignal 120A, 120B ausgebildet sind. Je nach Implementierung können das erste und zweite Messsignal 120A, 120B analoge oder digitale Signale sein, die die interessierende physikalische Größe 102 anzeigen. Der erste und der zweite Signalpfad 110A, 110B können in einem gemeinsamen integrierten Schaltkreis (IC) integriert sein oder beispielsweise in verschiedenen ICs implementiert sein. Die Sensorelemente und elektrischen Schaltungskomponenten des ersten und des zweiten Signalpfades 110A, 110B sind möglicherweise nicht identisch, und daher können die jeweiligen Sensorelemente und/oder die jeweiligen weiteren Schaltungskomponenten des ersten und des zweiten Signalpfades 110A, 110B die jeweiligen unterschiedlichen Signallaufzeitverzögerungen t_{ca} , t_{cb} verursachen.

[0048] Bei einigen Ausführungsbeispielen können die jeweiligen Sensorelemente des ersten und zweiten Signalpfades 110A, 110B die gleiche Sensortechnologie verwenden. Alternativ können die Sensorelemente auch unterschiedliche Sensortechnologien verwenden. Im Falle von Rotationssensoren (Winkelsensoren) kann ein Winkelsensor des ersten Signalpfades 110A beispielsweise einen xMR-Winkelsensor aufweisen. Bei einigen Ausführungsbeispielen könnte ein für den zweiten Signalpfad 110A verwendeter Winkelsensor auch ein xMR-Winkelsensor sein oder als Hall-Sensor implementiert werden. Bei einigen Ausführungsbeispielen können die Winkelsensoren beider Signalpfade 110A, 110B als Hall-Sensoren implementiert sein. Auf Ausführungsbeispiele mit Sensorelementen verschiedener Sensortechnologien wird am Ende dieser Offenbarung näher eingegangen.

[0049] Neben den Sensorelementen können die jeweiligen Signalpfade 110A, 110B weitere Schaltungskomponenten wie z.B. Analog-Digital-Wandler (ADC), Signalverarbeitung zur Offsetkompensation und Signalverarbeitung zur Umwandlung von Messsignalen in Winkelschätzungen aufweisen. Die Abtastzeiten der jeweiligen ADCs der Signalpfade 110A, 110B können unterschiedlich sein, was ebenfalls zu den unterschiedlichen Signallaufzeitverzögerungen t_{ca} , t_{cb} beiträgt.

[0050] Ein Beispiel für einen Signalpfad 110 für Anwendungen zur Winkelerfassung ist in Fig. ICschematisch dargestellt.

[0051] Ein physikalisches Signal von Interesse 102, zum Beispiel ein rotierendes Magnetfeld, kann über ein oder mehrere Sensorelemente 111 in elektrische Signale umgewandelt werden. Bei Anwendungen zur Winkelmessung können die Sensorelemente 112 eine erste analoge Signalkomponente 112-1 liefern, die idealerweise $\cos(\alpha)$ entspricht, und eine zweite analoge Signalkomponente 112-2, die idealerweise $\sin(\alpha)$ entspricht, wobei α einen Winkel bezeichnet, der auf der Grundlage des rotierenden Magnetfelds gemessen werden soll. Nachfolgende Analog-Digital-Wandler (ADCs) 113 können die analogen Signalkomponenten 112-1, 112-2 in den digitalen Bereich umwandeln. Anstelle des ADC 113 können auch Verstärker verwendet werden, wenn man die Signalkomponenten 112-1, 112-2 direkt im analogen Bereich verarbeiten will. Optionale Kompensationsschaltungsanordnungen 114 (z. B. Autokalibrierungsschaltungen) können unbeabsichtigte Auswirkungen von Nicht-Idealitäten der Sensorelemente 111 und des ADC 113 auf die Signalkomponenten 112-1, 112-2 minimieren. Die Nachbearbeitung 115 kann die interessierende physikalische Größe (z. B. den Winkel α) aus einem oder mehreren Signalen schätzen, die vom ADC 113 und der optionalen Kompensation 114 bereitgestellt werden. Bei Winkelsensoren kann ein CORDIC (COordinate Rotation Digital Computer) 115 verwendet werden, um den Winkel aus den von den Sensorelementen 111 erzeugten cos- und sin-Komponenten 112-1, 112-2 zu berechnen. Schließlich können eine Nachschlagetabelle (LUT) 116 oder fortschrittlichere Verfahren verwendet werden, um weitere Signalunregelmäßigkeiten zu kompensieren.

[0052] Der Fachmann, der aus der vorliegenden Offenbarung einen Vorteil zieht, erkennt, dass die analoge und digitale Signalverarbeitung eines Signalpfades 110 von einem Sensorelement zum Schätz- oder Messsignal 120 eine Signallaufzeitverzögerung verursacht. So beeinflusst die interne Signalverarbeitung integrierter Sensorsysteme die erfassten Signale und die Zeitgebung. Dies ist in **Fig. 2A** dargestellt.

[0053] **Fig. 2A** zeigt schematisch eine Zeitgebung eines beispielhaften Signalpfades 110. Im Allgemeinen kann jeder Signalweg das physikalische Signal von Interesse $y(t)$ 102 über einen bestimmten Zeitraum T_{av} erfassen, der zum Zeitpunkt t_i beginnt und zum Zeitpunkt t_f endet. Das interessierende Signal könnte z. B. der Winkel α eines rotierenden Magnetfeldes sein. Die Zeitspanne T_{av} kann z. B. durch eine Filterbandbreite, Zerhackungs- und Spinning-Current-Schemata usw. gegeben sein. Der Einfachheit halber wird ein zentraler Zeitpunkt dieser Mittelungszeitspanne mit t_c bezeichnet.

[0054] Es wird davon ausgegangen, dass die Probenahme zu einem bestimmten Zeitpunkt t_{trig} ausgelöst wird. Eine gewisse Zeitspanne T_{del} später wird der zentrale Zeitpunkt t_c der Mittelwertbildung erreicht. Je nach der Architektur des Signalpfades kann die zentrale Zeit t_c sogar vor der Auslösezeit liegen - in solchen Fällen ist T_{del} negativ. Die Signalverarbeitung und die optionale Übertragung nehmen eine weitere Zeitspanne T_{proc} in Anspruch. Nach der akkumulierten Zeitspanne ($T_{del}+T_{proc}$), zum Zeitpunkt t_s , würde die ausgelöste Abtastung y_i (Messsignale 120A, 120B) für den Signalvergleich zur Verfügung stehen. In guter Näherung entspricht der Abtastwert y_i dem physikalischen Signal zum zentralen Zeitpunkt t_c , also $y_i \approx y(t_c)$. Daher wird diese zentrale Zeit t_c auch als effektive Abtastzeit bezeichnet. Die Abtastperiode T_s kann als die Zeitspanne definiert werden, bis der nächste Abtastwert verfügbar ist.

[0055] **Fig. 2B** zeigt schematisch die Auswirkungen von Filter- und Signalverarbeitungsverzögerungen in einem Signalpfad 110.

[0056] Bezugszeichen 102 bezeichnet den aktuellen Verlauf einer interessierenden physikalischen Größe, wie z. B. einen Winkel eines rotierenden Magnetfeldes. Die interne Signalverarbeitung entlang eines Signalpfades 110 einer Sensorvorrichtung umfasst verschiedene Zeitverzögerungen, wie z. B. die Filterverzögerung 201, die Verarbeitungsverzögerung 202, z. B. aufgrund der Abtastung und der digitalen Signalverarbeitung, und zusätzliche Zeitgebungs-Effekte 203 aufgrund der Abtastung. Diese interne Signalverarbeitung führt zu einem Versatz (Offset) oder Fehler 204 zwischen der tatsächlichen physikalischen Größe 102 und dem Ausgangsmesssignal 120.

[0057] Sicherheitsmechanismen für den Signalvergleich, wie sie in **Fig. 1A**, **Fig. 1B** dargestellt sind, können eine hervorragende Diagnoseabdeckung für Anwendungen bieten, die funktionale Sicherheit erfordern, insbesondere bei Verwendung verschiedener Signalpfade 110A, 110B. Außerdem sind solche Sicherheitsmechanismen in der Regel einfach zu implementieren, da die Differenz zweier Signale mit bestimmten Grenzen verglichen werden muss. Die verschiedenen Signalpfade 110A, 110B können jedoch aufgrund von Konstruktionseinschränkungen unterschiedliche Signallatenzen erzeugen. Bei Hochgeschwindigkeitsanwendungen, bei denen sich Signale in Abhängigkeit von der Zeit schnell ändern können, können herkömmliche Signalvergleichsmechanismen zu Fehlalarmen und Verfügbarkeitsverlusten führen.

[0058] Sowohl bei den in **Fig. 1A**, **Fig. 1B** dargestellten synchronen als auch bei den asynchronen Konzepten entsprechen die Messsignale 120A, 120B, die von den beiden Signalpfaden 110A, 110B für den Signalvergleich bereitgestellt werden, dem physikalischen Signal von Interesse 102 zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Bei Hochgeschwindigkeitsanwendungen können diese Zeitunterschiede zu unbeabsichtigten Unterschieden der Abtastwerte oder Messsignale 120A, 120B führen.

[0059] Eine grafische Erläuterung von Fehlalarmen, die durch unterschiedliche Zeitgebungen zwischen zwei Messsignalpfaden 110A, 110B verursacht werden, ist in **Fig. 2C** dargestellt, die zwei unterschiedliche Messsignale 120A, 120B derselben physikalischen Größe 102 zeigt, die mit zwei unterschiedlichen Messsignalpfaden 110A, 110B mit unterschiedlichen Signallaufzeitverzögerungen und Abtastzeiten gemessen werden. Der resultierende Fehler 205 beim Vergleich dieser beiden Messsignale 120A, 120B ist in **Fig. 2D** zu sehen. Wie man sieht, kann der Fehler 205 aufgrund von Zeitgebungs-Fehlanpassungen zwischen den beiden Messsignalen 120A, 120B niemals Null sein. Ein Fehler 205, der eine bestimmte Fehlerschwelle überschreitet, kann in einem funktionalen Sicherheitssystem sogar zu einem Fehlalarm führen.

[0060] Ein Ansatz könnte darin bestehen, diesen Effekt zu berücksichtigen und die Grenzwerte für den Sicherheitsmechanismus des Signalvergleichs in Block 130 entsprechend zu lockern. Dies ist jedoch bei

Anwendungen mit hoher Genauigkeit vielleicht nicht möglich und kann somit den erreichbaren Diagnosedegrad des Sicherheitsmechanismus verringern.

[0061] Wie bereits erläutert, haben unterschiedliche und insbesondere diverse Signalpfade 110A, 110B im Allgemeinen unterschiedliche Zeitgebungs-Eigenschaften. Für einen optimalen Signalvergleich sollte das Ziel sein, möglichst ähnliche effektive Abtastzeiten t_c für die verschiedenen Signalpfade zu erreichen. Bei Hochgeschwindigkeitsanwendungen kann eine genaue Zeitgebung für Sicherheitsmechanismen, die Signale verschiedener Signalpfade vergleichen, von entscheidender Bedeutung sein. Ausführungsbeispiele der vorliegenden Offenbarung schlagen verschiedene Konzepte vor, die eine optimale zeitliche Übereinstimmung zwischen Abtastwerten 120A, 120B aus verschiedenen Signalpfaden gewährleisten und so den Fehler 205 zwischen zwei redundanten Messsignalen 120A, 120B derselben physikalischen Größe möglichst gering halten.

[0062] Fig. 3 zeigt ein Blockdiagramm einer Vorrichtung 300 zum Vergleich eines ersten Signals und eines zweiten Signals gemäß den Ausführungsbeispielen der vorliegenden Offenbarung.

[0063] Die Vorrichtung 300 umfasst einen ersten Signalpfad 110A für ein erstes Messsignal 120A einer physikalischen Größe 102. Der erste Signalpfad 110A hat eine erste Signallaufzeitverzögerung t_{ca} . Die Vorrichtung 300 umfasst auch einen (redundanten) zweiten Signalpfad 110B für ein zweites Messsignal 120B der physikalischen Größe 102. Der zweite Signalpfad 110B hat eine zweite Signallaufzeitverzögerung t_{cb} , die sich von der ersten Signallaufzeitverzögerung t_{ca} unterscheidet. Die Vorrichtung 300 umfasst eine Verzögerungskompensationsschaltung 310, die so ausgebildet ist, dass sie eine Differenz d zwischen der ersten und zweiten Signalausbreitungsverzögerung t_{ca} , t_{cb} kompensiert, um ein verzögerungskompensiertes oder zeitlich ausgerichtetes erstes und zweites Messsignal 120A', 120B' zu erzeugen. Die Vorrichtung 300 umfasst auch eine Vergleichsschaltung 130, die so ausgebildet ist, dass sie das verzögerungskompensierte erste und zweite Messsignal 120A', 120B' für die funktionale Sicherheit vergleicht. Die Vergleichsschaltung 130 kann konventionellen Vergleichsschemata entsprechen oder zusätzliche Funktionen zur Signalkombination umfassen, wenn Sensoren unterschiedlicher Sensortechnologien verwendet werden. Dies wird später noch genauer beschrieben.

[0064] Obwohl sich die vorliegende Offenbarung auf den Signalvergleich von zwei Signalen 120A', 120B' konzentriert, ist anzumerken, dass die vorgeschlagenen Konzepte auch für den Vergleich von mehr Signalen, z. B. für drei oder vier Signale, anwendbar sind. Der Fachmann, der einen Vorteil aus der vorliegenden Offenbarung zieht, wird erkennen, dass die Vergleichsschaltung 130 zusammen mit den Signalpfaden 110A, 110B in einer Sensorvorrichtung oder extern implementiert werden kann. Für den Fall des externen Signalvergleichs können die Signalpfade 110A, 110B in einer Vorrichtung oder in zwei separaten Vorrichtungen implementiert werden.

[0065] Im Folgenden wird eine Ausführungsform zur Erzielung gleicher effektiver Abtastzeiten und damit eines optimalen Signalvergleichs für den synchronen Betrieb der Signalpfade 110A, 110B unter Bezugnahme auf Fig. 4 beschrieben.

[0066] Fig. 4A zeigt schematisch eine Vorrichtung 400 zum Vergleichen eines ersten Signals 120A und eines zweiten Signals 120B, wobei die Verzögerungskompensationsschaltung 310 so ausgebildet ist, dass sie eine erste Signalverarbeitung zur Abtastwerterfassung des ersten Signalpfads 110A auslöst und eine zweite Signalverarbeitung zur Abtastwerterfassung des zweiten Signalpfads 110B zu unterschiedlichen Zeitpunkten auslöst, um das verzögerungskompensierte (zeitlich abgestimmte) erste und zweite Ausgangssignal 120A', 120B' an den jeweiligen Ausgängen des ersten und des zweiten Signalpfads 110A, 110B zu erhalten. Eine Differenz zwischen einer ersten Auslösezeit für den ersten Signalpfad 110A und einer zweiten Auslösezeit für den zweiten Signalpfad 110B kann auf einer Differenz zwischen der ersten und der zweiten Signallaufzeitverzögerung und/oder unterschiedlichen Abtastperioden, die im ersten und zweiten Signalpfad verwendet werden 110A, 110B, basieren. Zum Beispiel kann die Verzögerungskompensationsschaltung 310 so ausgebildet sein, dass sie den ersten Signalpfad 110A früher auslöst als den zweiten Signalpfad 110B, wenn die erste Signallaufzeitverzögerung länger ist als die zweite Signallaufzeitverzögerung, oder umgekehrt.

[0067] Beispielsweise kann angenommen werden, dass die beiden Signalpfade 110A, 110B interne Filterverzögerungen von $T_{del,a}$ und $T_{del,b}$ haben, und ohne Verlust der Allgemeingültigkeit kann definiert werden, dass $dt_a = T_{del,b} - T_{del,a}$ ist, und angenommen werden, dass $dt_a > 0$ ist, d.h. die Filterverzögerung des Signalpfades 110B ist größer als die Filterverzögerung des Signalpfades 110A. In diesem Fall kann eine Auslöseverzögerung dt_b für den Signalpfad 110B übersprungen werden, d. h. $dt_b = 0$. Angenommen, zum Zeitpunkt

$t = 0$ gibt die Verzögerungskompensationsschaltung 310, die eine Auslöselogik umfasst, einen Auslöseimpuls aus. Der Signalpfad 110B kann sofort ausgelöst werden und einen Mess-Abtastwert y_b 120B' mit der effektiven Abtastzeit $t_{c,b} = T_{del,b}$ erfassen. Der Signalpfad 110A kann den Abtastwert y_b zu einem Zeitpunkt $t_{s,b} = T_{del,b} + T_{proc,b}$ ausgeben. Abgesehen von Unvollkommenheiten des Signalpfades und Effekten der Mittelwertbildung entspricht dieser Abtastwert y_b dem physikalischen Signal von Interesse $y(t)$ 102 zum effektiven Abtastzeitpunkt $t_{c,b}$, d.h. $y_b \approx y(t_{c,b})$.

[0068] Signalpfad 110A empfängt einen verzögerten Auslöser bei $t_{trig,a} = dt_a = T_{del,b} - T_{del,a}$ von der Verzögerungskompensationsschaltung 310, die die Auslöselogik umfasst. Der Signalpfad 110A erfasst einen Mess-Abtastwert y_a 120A' mit der effektiven Abtastzeit $t_{c,a} = t_{trig,a} + T_{del,a} = t_{c,b}$, d. h. mit der gleichen effektiven Abtastzeit wie der Signalpfad 110B. Der Signalpfad 110A gibt den Abtastwert y_a zu einem Zeitpunkt $t_{s,a} = T_{del,a} + T_{proc,a}$ aus. Obwohl der Abtastwert y_a im Allgemeinen zu einem anderen Zeitpunkt als der Abtastwert y_b zur Verfügung steht, entspricht er dem interessierenden physikalischen Signal $y(t)$ zum gleichen effektiven Abtastzeitpunkt $t_{c,b}$, d.h. $y_a \approx y(t_{c,b})$. Daher muss die Signalvergleichsschaltung 130 nur jeden Mess-Abtastwert 120A', 120B' abrufen, wenn er verfügbar ist, und ihre Differenz mit bestimmten Schwellenwerten vergleichen.

[0069] Bei einigen Ausführungsbeispielen können jedoch verschiedene Signalpfade 110A, 110B unterschiedliche Abtastperioden $T_{s,A}$, $T_{s,B}$ benötigen. Für den Signalvergleich kann es sinnvoll sein, die längere Abtastperiode als ein Vielfaches der kürzeren Abtastperiode zu wählen. Das allgemeine Konzept von **Fig. 4A** kann mit kleinen Anpassungen auch für solche Operationen geeignet sein, siehe **Fig. 4B**. In diesem Fall kann die Verzögerungskompensationsschaltung 310 umfassend die Auslöselogik die bereits ordnungsgemäß verzögerten Auslöseimpulse an beide Signalpfade 110A, 110B ausgeben. Für den Signalpfad 110A, 110B mit der längeren Abtastperiode kann die Verzögerungskompensationsschaltung 310 umfassend die Auslöselogik so viele Auslöseimpulse auslassen, wie erforderlich sind, um die gewünschte effektive Abtastperiode zu erreichen. Darüber hinaus kann die Verzögerungskompensationsschaltung 310 umfassend die Auslöselogik der Vergleichsschaltung 130 signalisieren, wann welcher Mess-Abtastwert y_a , y_b zum Vergleich abgerufen werden soll.

[0070] Bei dem Konzept von **Fig. 4B** kann die Vergleichsschaltung 130 entsprechend der längeren Abtastperiode arbeiten und nicht jeden einzelnen Ausgangs-Abtastwert vergleichen. Wenn dies das Ziel ist, kann die Implementierung eines Interpolationsmechanismus für den asynchronen Betrieb angemessen sein, der im Folgenden beschrieben wird.

[0071] Bei asynchronem Betrieb (siehe **Fig. 1B**) ist die Zeitgebung zwischen den Auslösepunkten $t_{trig,A}$, $t_{trig,B}$ unter Umständen nicht exakt steuerbar. Daher kann ein Interpolationsmechanismus (oder sogar eine Extrapolation) erforderlich sein.

[0072] **Fig. 5A** zeigt eine Ausführungsform einer Vorrichtung 500 zum Vergleichen eines ersten Signals und eines zweiten Signals für den asynchronen Betrieb der Signalpfade 110A, 110B.

[0073] Für einen asynchronen Betrieb kann die Verzögerungskompensationsschaltung 310 eine Filterschaltung 510 umfassen, die mit den jeweiligen Ausgängen der Signalpfade 110A, 110B gekoppelt und so ausgebildet ist, dass sie ein gefiltertes Messsignal für mindestens einen des ersten oder zweiten Signalpfades 110A, 110B erzeugt. Das gefilterte Messsignal 120A' bzw. 120B' ist im Wesentlichen zeitlich mit dem anderen Messsignal 120B' bzw. 120A' des anderen Signalpfades ausgerichtet. Darüber hinaus kann die Verzögerungskompensationsschaltung 310 entsprechende Abtast- und Halteschaltungen (S/H) 515A, 515B umfassen, die zwischen die Filterschaltung 510 und die Vergleichsschaltung 130 gekoppelt und mit den jeweiligen Signalpfaden 110A, 110B verbunden sind. Die Filterschaltung 510 kann eine Interpolation/Extrapolation von mindestens einem der Messsignale 120A oder 120B durchführen, die am Ausgang der Signalpfade 110A, 110B bereitgestellt werden. Zusammen mit den S/H-Schaltungen 515A, 515B kann die Filterschaltung 510 die Zeitgebung der beiden zu vergleichenden Messsignale angleichen.

[0074] Für die Verzögerungssynchronisation können einfache digitale Filter verwendet werden, um die Bandbreite des Signalpfades mit höherer Bandbreite (schnellerer Kanal) auf die des Signalpfades mit niedrigerer Bandbreite (langsamerer Kanal) zu reduzieren. Die meisten Anwendungen der funktionalen Sicherheit erfordern Sicherheitsreaktionszeiten, die viel größer sind als die Aktualisierungszeit eines Sensorsignals, was eine zusätzliche Filterung des schnelleren Kanals ermöglicht. Beispielsweise können in diesem Zusammenhang Finite-Impulse-Response-Filter (FIR) mit konstanter Phasenverzögerung verwendet werden, wie in **Fig. 5B** gezeigt. Das FIR-Filter kann eine Filterverzögerung aufweisen, die einer Differenz zwischen der ers-

ten und der zweiten Signallaufzeitverzögerung entspricht. Der Fachmann, der einen Vorteil aus der vorliegenden Offenbarung zieht, wird erkennen, dass auch andere Filter mit geeigneten Filterverzögerungen verwendet werden können.

[0075] Fig. 6A, Fig. 6B zeigen verschiedene Implementierungen der Synchronisierung eines Signalpfads mit hoher Bandbreite mit einem Signalpfad mit niedriger Bandbreite. Während **Fig. 6A** die Filterung eines schnellen Signalpfades 110A zu einem langsameren Signalpfad 110B zeigt, zeigt **Fig. 6B** die Filterung eines schnellen Signalpfades 110B zu einem langsameren Signalpfad 110A.

[0076] Weist Kanal a einen schnellen Signalpfad mit hoher Bandbreite auf, kann die Zeitgebung durch Verringerung der Bandbreite mit einem digitalen Filter 610 synchronisiert werden. Dieses Konzept hat den Vorteil, dass es verzögerungskompensierte Abtastwerte 120A und/oder 120B bereitstellt. Im Falle des Signalpfades 110A, der den schnellen Kanal mit hoher Bandbreite darstellt, kann diese Idee gemäß **Fig. 6A** umgesetzt werden. Hier ist ein digitales FIR-Filter 610 zwischen den Ausgang des Signalpfades 110A und die Vergleichsschaltung 130 gekoppelt, während der Ausgang des Signalpfades 110B direkt mit der Vergleichsschaltung 130 gekoppelt ist. Der Fall des Signalpfades 110B, der den schnellen Kanal mit hoher Bandbreite darstellt, ist in **Fig. 6B** dargestellt. Hier ist das digitale FIR-Filter 610 zwischen den Ausgang des Signalpfades 110B und die Vergleichsschaltung 130 gekoppelt, während der Ausgang des Signalpfades 110A direkt mit der Vergleichsschaltung 130 gekoppelt ist. Somit ist das FIR-Filter 610 in dem Signalpfad mit der kürzeren Signallaufzeitverzögerung (höhere Bandbreite) umfasst.

[0077] Der Vergleich zwischen dem Hochgeschwindigkeits- und dem Niedergeschwindigkeitsmesskanal funktioniert bei diesem Konzept wie folgt (**Fig. 6A**):

1. Die Signalpfade 110A, 110B sollten aufgrund der benachbarten Filterung synchron getriggert werden.
2. Das digitale Filter 610 wird mit der gleichen oder einer ganzzahligen multiplizierten oder geteilten digitalen Taktfrequenz betrieben wie der Signalpfad 110A. Die Parameter des digitalen Filters 610 können so eingestellt werden, dass die Signalverzögerung des verzögerten Signalpfades 110A mit den digitalen Daten des Signalpfades 110B übereinstimmt.
3. Das synchron verarbeitete und gefilterte Signal 120A' wird dann mit dem synchronisierten Ausgang 120B des Signalpfades 110B verglichen, um den Diagnoseausgang zu erzeugen.

[0078] Wenn ein Kanal einen schnellen Signalpfad mit hoher Bandbreite und der andere Kanal einen langsamen Signalpfad mit niedriger Bandbreite aufweist, können die Ausgänge des Kanals mit niedriger Bandbreite so behandelt werden, dass eine Signalvorhersage implementiert wird, die an die Signalverzögerung des schnellen Kanals mit hoher Bandbreite angepasst ist. Zu diesem Zweck kann ein Vorhersagefilter im ersten Signalpfad 110A oder im zweiten Signalpfad 110B vorgesehen sein, wobei das Vorhersagefilter ein Vorhersagezeitintervall aufweist, das im Wesentlichen einer Differenz zwischen der ersten und der zweiten Signallaufzeitverzögerung entspricht. Hier bezeichnet das Vorhersagezeitintervall ein Zeitintervall, in dem das Vorhersagefilter in die Zukunft „schaut“. Dieses Konzept kann den Vorteil haben, dass es verzögerungssynchronisierte Abtastwerte bereitstellt.

[0079] Fig. 7A zeigt schematisch eine Implementierung, bei der der Signalpfad 110A den langsamen Kanal mit geringer Bandbreite darstellt, dessen Ausgang durch das Vorhersagefilter 710 vorhergesagt wird, das zwischen dem Signalpfad 110A und der Signalvergleichsschaltung 130 gekoppelt ist, um mit dem schnellen Signalpfad 110B übereinzustimmen. **Fig. 7B** zeigt schematisch eine Implementierung, bei der der Signalpfad 110B den langsamen Kanal mit geringer Bandbreite darstellt, dessen Ausgang durch das Vorhersagefilter 710 vorhergesagt wird, das zwischen dem Signalpfad 110B und der Signalvergleichsschaltung 130 gekoppelt ist, um mit dem schnellen Signalpfad 110A übereinzustimmen. Die Abtastwerte, die die Sensorvorrichtung 700, 750 zu einem bestimmten Zeitpunkt t ausgibt, schätzen direkt das physikalische Signal von Interesse 102 zu diesem Zeitpunkt t . Diese Implementierung kann daher für Schnittstellen mit geringer Latenzzeit geeignet sein, z. B. inkrementelle Schnittstelle (IIF) und Hall-Switch-Modus (HSM) für Winkelsensoren.

[0080] Das Vorhersagefilter 710 kann beispielsweise ein Kalman-Filter umfassen, das in **Fig. 7C** schematisch dargestellt ist.

[0081] Fig. 7C zeigt eine beispielhafte Implementierung des Vorhersagefilters 710, d. h. für die Vorhersage/Interpolation eines oder beider Signale y_a , y_b . Um beide Signale unabhängig voneinander vorherzusagen, können für jeden Signalpfad 110A, 110B entsprechende Vorhersagefilter 710 verwendet werden. Speziell für

den Vergleich von Hochgeschwindigkeitssignalen kann es jedoch ausreichen, nur eines der Signale, entweder y_a oder y_b , vorherzusagen/zu interpolieren.

[0082] Durch die Verwendung eines Kalman-Filters für die Zustandsraumschätzung als Vorhersagefilter 710 können die Auswirkungen des unvermeidlichen Signalrauschens auf die Vorhersage minimiert werden. Dies ist zwar nicht unbedingt erforderlich, wenn man die Anpassung der Abtastzeiten auf die Interpolation beschränkt, kann aber die Interpolationsqualität verbessern und ist für jede Art von Signalextrapolation zu empfehlen. Für geeignete Systeme kann ein Kalman-Filter aus Sicht der Signaltheorie den optimalen Schätzer bereitstellen.

[0083] Typische Systemzustandsräume umfassen Schätzer für das interessierende Signal $y(t)$ 102, seine erste Ableitung $dy(t)/dt$ und optionale Ableitungen höherer Ordnung $d_n y(t)/dt_n$ sowie die Unsicherheiten dieser Schätzer in Form ihrer Kovarianzmatrix. Für ausreichend schnelle Abtastperioden und sich gut verhaltende physikalische Signale von Interesse $y(t)$ kann ein linearisiertes Systemmodell erster Ordnung bis zu $dy(t)/dt$ für eine akzeptable Genauigkeit ausreichen. Dann genügen lineare Kalman-Filter, die mit begrenzten Rechenressourcen sehr effizient implementiert werden können.

[0084] Es folgt eine kurze Erläuterung des Kalman-Filters: Zu jedem Zeitpunkt spiegelt ein Systemmodell 711 das verfügbare Wissen über die Schätzer und ihre Unsicherheit (über ihre Kovarianzmatrix) auf der Grundlage aller zuvor erfassten Abtastwerte wider. Wenn ein neuer Abtastwert eintrifft (oder idealerweise kurz vorher), berechnet ein Kalman-Vorhersageblock 712 einen erwarteten Abtastwert und seine Unsicherheit auf der Grundlage des verfügbaren Wissens. Ein Kalman-Aktualisierungsblock 713 vergleicht den gemessenen Abtastwert y_i mit diesem erwarteten Abtastwert und aktualisiert das Systemmodell 711 in geeigneter Weise.

[0085] Da dem Kalman-Filter 710 verzögerte Abtastwerte $y_i \approx y(t_{c,i})$ bereitgestellt werden, entsprechen auch seine Zustandsschätzungen diesen verzögerten Zeiten. Der optimale Schätzer, $y_i' \approx y(t)$, für das physikalische Signal von Interesse 102 zum gegenwärtigen Zeitpunkt (oder eigentlich zu jedem anderen Zeitpunkt $t > t_{c,i}$) kann durch einen Latenzvorhersageblock 714 berechnet werden. Im Allgemeinen kann dies derselbe Vorgang sein, den bereits der Kalman-Vorhersageblock 712 durchführt. Daher können diese beiden Blöcke in einer Implementierung kombiniert werden.

[0086] Ein einfacheres alternatives Konzept für die Vorhersage wäre die lineare Interpolation/Extrapolation als Alternative. Für jeden neuen Abtastwert y_i mit der entsprechenden effektiven Abtastzeit $t_{c,i}$ der vom Vorhersagefilter 710 empfangen wird, kann ein Finite-Differenzen-Quotient $\Delta y_i/\Delta t = (y_i - y_i(\text{old})) / (t_{c,i} - t_{c,i}(\text{alt}))$ unter Verwendung des zuvor empfangenen Abtastwerts $y_i(\text{alt})$ und seiner effektiven Abtastzeit $t_{c,i}(\text{alt})$ berechnet werden. $\Delta y_i/\Delta t$ und zusätzlich y_i und $t_{c,i}$, müssen gespeichert werden. Dann kann das interessierende physikalische Signal $y_i'(t)$ zu einem bestimmten Zeitpunkt t durch lineare Interpolation/Extrapolation gemäß $y_i'(t) = y_i + \Delta y_i/\Delta t * (t - t_{c,i})$ geschätzt werden. Natürlich kann dieses Verfahren aufgrund der Auswirkung des Signalrauschens auf den Differenzquotienten einem ordnungsgemäß konzipierten Kalman-Filter für die Extrapolation unterlegen sein. Für die Interpolation könnte die Performance dieses Schemas jedoch ausreichend sein.

[0087] Der Hochgeschwindigkeitsvergleich funktioniert für das Konzept von **Fig. 7** wie folgt:

1. Der Signalpfad 110A sollte so oft wie möglich ausgelöst werden. Dadurch wird die beste Performance bei der anschließenden Vorhersage bereitgestellt. Dank der Vorhersage sind Schätzer für das interessierende physikalische Signal (praktisch ohne Verzögerung) für jeden beliebigen Zeitpunkt verfügbar.
2. Wenn der „Sicherheits“-Signalpfad 110B ausgelöst wird, z. B. zu einem Zeitpunkt $t_{\text{trig},b}$, kann dieses Auslösesignal um die Zeitspanne dt_{sh} verzögert (die gleich $T_{\text{del},b}$ sein sollte) und dann an den S/H-Block 515 weitergeleitet werden. Diese Verzögerung stellt sicher, dass der Auslöser für den S/H-Block 515A $t_{\text{trig},\text{sh}} = t_{\text{trig},b} + dt_{\text{sh}}$, mit dem effektiven Abtastpunkt $t_{c,b}$ für den Signalpfad 110B zusammenfällt.
3. Nach der Auslösung kann der S/H-Block 515A den vorhergesagten Abtastwert y_a' aus dem Signalpfad 110A abrufen und für den nachfolgenden Signalvergleich speichern. Wie oben beschrieben, spiegelt dieser Abtastwert das physikalische Signal von Interesse zum Zeitpunkt $t_{c,b}$ wider, also $y_a' \approx y(t_{c,b})$.
4. Sobald der Abtastwert y_b aus dem Signalpfad 110B verfügbar ist, vergleicht die Signalvergleichsschaltung 130 die beiden Eingangssignale: den im S/H-Block 515A gespeicherten Abtastwert $y_a' \approx y(t_{c,b})$ aus dem Signalpfad 110A und den direkt vom Signalpfad 110B bereitgestellten Abtastwert $y_b \approx y(t_{c,b})$. Da beide Abtastwerte dem interessierenden physikalischen Signal zum gleichen Zeitpunkt entsprechen, ist ein optimaler Signalvergleich mit engen Grenzen und guter diagnostischer Abdeckung möglich.

[0088] Ein zusätzlicher Vorteil dieses Konzepts besteht darin, dass die Signalvergleichsschaltung 130 die Vorhersage von sich aus überprüft. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass sich das interessierende physikalische Signal tatsächlich so entwickelt hat, wie es vom Systemmodell 711 im Kalman-Filter/Vorhersageblock 710 vorhergesagt wurde.

[0089] Mit kleinen Anpassungen kann diese Implementierung auch für Schnittstellen mit konstanter Latenz (d. h. mit geringem Jitter) geeignet sein. In diesem Fall würde der Latenzvorhersageblock etwas anders ausgebildet sein. Angenommen, die Schnittstelle fügt eine Latenzzeit von T_{tx} für die Übermittlung der Informationen hinzu. Dann würde man diese Zeitspanne zur konfigurierten Vorhersagezeit des Latenzvorhersageblocks addieren, so dass dieser zu jedem Zeitpunkt t einen Wert $y_a'(t)$ liefert, der dem physikalischen Signal zum Zeitpunkt $(t+T_{tx})$ entspricht, d.h. $y_a'(t) \approx y(t+T_{tx})$. Die Übertragung über die Schnittstelle mit konstanter Latenz dauert eine Zeitspanne T_{tx} . Dann entspricht der empfangene Wert, sagen wir y_a' ; wieder dem physikalischen Signal zum richtigen Zeitpunkt, $y_a''(t+T_{tx}) \approx y(t+T_{tx})$. Natürlich muss der Verzögerungsblock entsprechend angepasst werden, d.h. auf eine Verzögerung von $dt_{sh} = T_{del,b} + T_{tx}$.

[0090] Bei der in **Fig. 7A** gezeigten Implementierung wird die Vorhersage/Interpolation für den „Sicherheits“-Signalpfad 110B durchgeführt. Obwohl das Konzept ähnlich aussieht wie die Vorhersage des Signalpfades 110A (**Fig. 7B**), ist die Idee eine andere. In **Fig. 7B** wird jeder vom Signalpfad 110A bereitgestellte Abtastwert so schnell wie möglich ausgegeben und im System verwendet. Übliche Systeme verwenden ohnehin eine Art Regelkreis mit Laufzeitkompensation. Daher kann diese Implementierung den zusätzlichen Aufwand (und die damit verbundenen Fehler) für eine zusätzliche Vorhersage des Hauptsignalpfades im Sensor ersparen. Die Sicherheitszeit kann erheblich länger sein als die für die Anwendung erforderliche funktionale Latenzzeit. Das bedeutet, dass die tatsächlichen Abtastwerte so schnell wie möglich ausgegeben werden sollen, der Signalvergleich aber zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt werden kann.

[0091] Das Verfahren für diese Implementierung kann wie folgt aussehen:

1. Der „Sicherheits“-Signalpfad 110B sollte so oft wie möglich ausgelöst werden, beispielsweise mit einer Abtastperiode $T_{s,b}$. Dies liefert die bestmöglichen Daten für den Signalvergleich. Es sind verschiedene Implementierungen für den Vorhersageblock 710 denkbar: Natürlich kann man auch ein vollwertiges Kalman-Filter wie für den Signalweg 110A oben implementieren. Für diese Implementierung kann jedoch das oben beschriebene einfachere lineare Interpolationsverfahren gewählt werden.

In diesem Fall sollte der Vorhersageblock 710 für jede Zeit t die Abtastwerte interpolieren, die der Zeit $(t - T_{s,b} - T_{proc,b})$ entsprechen. Bezogen auf die lineare Interpolation ergibt sich daraus $y_b'(t) = y_b + \Delta y_b / \Delta t * (t - T_{s,b} - T_{proc,b} - t_{c,i}) \approx y(t - T_{s,b} - T_{proc,b})$. Dieses Verhalten kann sicherstellen, dass der Vorhersageblock 710 immer im Interpolationsmodus betrieben wird und nicht extrapolieren muss. Dadurch können Fehler aufgrund von Abtastrauschen minimiert werden.

2. Wenn der Hauptsignalpfad 110A ausgelöst wird, z. B. zu einem Zeitpunkt $t_{trig,a}$, kann dieses Auslösesignal um eine bestimmte Zeitspanne dt_{sh} verzögert und dann an den S/H-Block 515B weitergeleitet werden. Diese Verzögerung kann sicherstellen, dass ein neuer Abtastwert des Signalpfades 110B für den Signalvergleich zur Verfügung steht, dessen effektive Abtastzeit nicht vor der effektiven Abtastzeit des ausgelösten Abtastwerts des Signalpfades 110A liegt, also $t_{c,b} \geq t_{c,a}$. Auf diese Weise können wir den Vorhersageblock 710 auf die Signalinterpolation statt auf die Extrapolation beschränken (die aufgrund von Signalrauschen und Verzögerung unnötige Fehler verursachen würde).

Eine Möglichkeit ist die Verzögerung des Auslösers um eine feste Zeit, $dt_{sh} = T_{del,a} + T_{proc,b} + T_{s,b}$. Nach dieser Zeitspanne ist ein neuer Abtastwert aus dem Signalpfad 110B verfügbar, für den $t_{c,b} \geq t_{c,a}$ gilt. Es ist also nur eine Interpolation und keine Extrapolation des Signals erforderlich.

3. Wenn die getriggerte Abtastung vom Signalweg a (signal_path a), $y_a \approx y(t_{ca})$, verfügbar wird, kann der Signalvergleichsblock 130 sie für einen späteren Vergleich speichern.

4. Wenn der verzögerte Auslöser den S/H-Block 515B zum Zeitpunkt $t_{trig,sh} = t_{trig,a} + dt_{sh}$ erreicht, kann der S/H-Block 515B einen Abtastwert $y_b'(t_{trig,sh})$ aus dem Vorhersageblock 710 erhalten. Aufgrund der Definition in Schritt 1 entspricht dieser Abtastwert $y_b'(t_{trig,sh}) \approx y(t_{trig,sh} - T_{s,b} - T_{proc,b}) = y(t_{ca})$, d. h. der effektiven Abtastzeit des Signals aus dem Signalpfad 110A.

Auch hier entsprechen beide Abtastwerte dem physikalischen Signal von Interesse zum gleichen Zeitpunkt. Daher ist ein optimaler Signalvergleich mit engen Grenzen und gutem Diagnosedegrad (Diagnostic Coverage) möglich.

[0092] Ein weiteres Beispiel für eine Implementierung ist die Verzögerung beider Kanäle durch entsprechende Filter, die auch Verzögerungsunterschiede ausgleichen können. Mögliche Umsetzungen sind in den

Abb. 8A, Abb. 8B dargestellt, wobei **Fig. 8A** die einzelnen Filter 610A, 610B zeigt. So kann eine Verzögerungskompensationsschaltung 310 gemäß den Ausführungsbeispielen der vorliegenden Offenbarung ein erstes FIR-Filter 610A in dem ersten Signalpfad 110A und ein zweites FIR-Filter 610B in dem zweiten Signalpfad 110B umfassen. Eine Summe der ersten Ausbreitungsverzögerung des ersten Signalpfads 110A und einer ersten Filterverzögerung des ersten FIR-Filters 610A entspricht im Wesentlichen einer Summe der zweiten Ausbreitungsverzögerung des zweiten Signalpfads 110B und einer zweiten Filterverzögerung des zweiten FIR-Filters 610B.

[0093] **Fig. 8B** zeigt ein Ausführungsbeispiel mit einzelnen Prädiktoren (Vorhersagern) 710A, 710B. So kann eine Verzögerungskompensationsschaltung 310 gemäß Ausführungsbeispiel ein erstes Vorhersagefilter 710A in dem ersten Signalpfad 110A und ein zweites Vorhersagefilter 710B in dem zweiten Signalpfad 110B umfassen. Eine Summe der ersten Ausbreitungsverzögerung des ersten Signalpfads 110A und eines ersten Vorhersage-Zeitintervalls des ersten Vorhersage-Filters 710A entspricht im Wesentlichen einer Summe der zweiten Ausbreitungsverzögerung des zweiten Signalpfads 110B und eines zweiten Vorhersage-Zeitintervalls des zweiten Vorhersage-Filters 710B. Ähnlich wie bei den zuvor beschriebenen Ausführungsbeispielen kann dieses Konzept verzögerungskompensierte Abtastwerte bereitstellen. Allerdings kann dies mit einem erhöhten Aufwand verbunden sein, da die Filterung oder Vorhersage in Form eines Kalman-Filters zweimal berechnet wird.

[0094] In diesem Fall sind die Zeitgebung und der Betrieb für 2x Filter 610A, 610B einfach:

1. Beide Signalpfade 110A, 110B sollten synchron ausgelöst werden, um die beiden Filterblöcke 610A, 610B mit optimal synchronisierten Informationen zu versorgen.
2. Durch die synchrone Abtastung können die Signale zeitlich verglichen werden, je nach den Erfordernissen der Anwendung der funktionalen Sicherheit.

[0095] Die Zeitgebung und der Betrieb für 2x Vorhersage 710A, 710B sind ebenfalls einfach:

1. Beide Signalpfade sollten so schnell wie möglich ausgelöst werden, um optimale Informationen für die beiden Vorhersageblöcke 710A, 710B bereitzustellen. Dank der Vorhersage sind Schätzer für das interessierende physikalische Signal (praktisch ohne Verzögerung) für jeden beliebigen Zeitpunkt von Interesse und für beide Signalpfade verfügbar.
2. So können die Signale zu jedem beliebigen Zeitpunkt verglichen werden, je nach den Anforderungen der Anwendung der funktionalen Sicherheit.

[0096] Für Signalpfade mit bestimmten Eigenschaften ist auch ein Hochgeschwindigkeits-Signalvergleich ohne jede Art von Vorhersage möglich, siehe **Fig. 9**. In diesem Fall wird nur der „Haupt“- (main) Signalpfad 110A asynchron ausgelöst (trigger a). Der Auslöser für den Signalpfad des „Sicherheits“- (safety) Kanals 110B wird vom Trigger_a abgeleitet, ähnlich wie bei dem zuvor beschriebenen synchronen Hochgeschwindigkeitssignalvergleich.

[0097] Das Verfahren für diese Implementierung kann wie folgt aussehen:

1. Der „Haupt“-Signalpfad 110A wird zu einem bestimmten Zeitpunkt, z. B. $t_{\text{trig},a}$, ausgelöst. Der Signalpfad 110A erfasst und verarbeitet den Abtastwert y_a , der dann dem interessierenden physikalischen Signal zum Zeitpunkt t_{ca} entspricht, d. h. $y_a \approx y(t_{ca})$.
2. Die Verzögerungskompensationsschaltung 910 kann eine Zeitspanne dt_b nach $t_{\text{trig},a}$ auslösen 110B. Dies kann dazu führen, dass die effektiven Abtastzeiten für beide Signalpfade 110A, 110B zusammenfallen. Um dies zu erreichen, wählen wir $dt_b = T_{\text{del},a} - T_{\text{del},b}$ und verlangen $dt_b > 0$ für die Kausalität. Der Signalpfad 110B erwirbt und verarbeitet den Abtastwert y_b , der dem interessierenden physikalischen Signal genau zur gleichen Zeit wie der Abtastwert y_a entspricht, d. h. $y_b \approx y(t_{ca})$.
3. Der Signalvergleichsblock 130 vergleicht die Differenz der beiden Abtastwerte y_a und y_b mit den vorgegebenen Grenzwerten. Da beide Abtastwerte dem interessierenden physikalischen Signal zum gleichen Zeitpunkt entsprechen, ist ein optimaler Signalvergleich mit engen Grenzen und guter diagnostischer Abdeckung möglich.

[0098] Eine Einschränkung für die Anwendbarkeit der Implementierung von **Fig. 9** sind die Freiheit, den Signalpfad 110B synchron zum Signalpfad 110A auszulösen und $dt_b = T_{\text{del},a} - T_{\text{del},b} > 0$ für die Kausalität.

[0099] Wie bereits erwähnt, können einige Ausführungsbeispiele der vorliegenden Offenbarung zur funktionalen sicheren Winkelmessung verwendet werden. Präzise Winkelmessungen verwenden integrierte magnetische Winkelsensoren. Die jüngsten Anforderungen an Winkelsensoren, die für die elektrische Kommutierung von Elektromotoren verwendet werden, sind auf sehr niedrige Werte der zulässigen Winkelfehler gesunken. Heutige Winkelmesssysteme umfassen die SINUS- (typischerweise Y-Komponente genannt) und COSINUS- (typischerweise X-Komponente genannt) Messung mit anschließender Winkelberechnung mittels der ARCTAN-Funktion (oder auch \tan^{-1} genannt):

$$\hat{\alpha} = \tan^{-1} \frac{Y}{X}$$

[0100] Das Problem besteht heute darin, sehr genaue Winkelmessungen im Bereich von $<0,2^\circ$ Winkelfehler zu erhalten.

[0101] Kombinationen von Winkelsensoren verschiedener Sensortechnologien sind vielversprechende Kandidaten, um sehr genaue Winkelmessungen zu erzielen und darüber hinaus redundante und vielfältige Sensortechnologien für funktionale Sicherheitsanwendungen bereitzustellen. Daher könnte in Ausführungsbeispielen der vorliegenden Offenbarung der Signalpfad 110A verwendet werden, um das erste Messsignal 120A der physikalischen Größe 102 von einem ersten Sensor in Übereinstimmung mit einer ersten Sensortechnologie zu bestimmen, während der Signalpfad 110B verwendet werden könnte, um das zweite Messsignal 120A der physikalischen Größe 102 von einem zweiten Sensor in Übereinstimmung mit einer zweiten Sensortechnologie zu bestimmen.

[0102] So können z. B. Kombinationen aus gesättigten Winkelsensoren (auf xMR-Basis) und linearen Winkelsensoren (z. B. auf der Basis von vertikalen Hall-Sonden, nachfolgend als VHALL bezeichnet) verwendet werden. Jede Sensortechnologie hat ihre Vorteile und Schwächen. Zum Beispiel,

- xMR-basierte Sensortechnologien bieten in der Regel ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis als Hall-basierte Sensortechnologien.
- AMR-basierte Sensoren stellen eine ausgezeichnete Stabilität in Bezug auf Phasendrifts und höhere harmonische Fehler bereit, sind jedoch in der Regel auf 180° begrenzt und weisen erhebliche Drifts der Ausgangsamplituden und Offsets auf.
- VHALL-basierte Sensoren bieten eine hervorragende Linearität und minimalen Restversatz (residual offset) aufgrund von Stromspinnverfahren (Offsetkompensation).

[0103] Es gibt Autokalibrierungsverfahren, die die nachteiligen Auswirkungen von Amplituden- und Offset-Drift xMR-basierter Sensortechnologien kompensieren. Diese Verfahren benötigen jedoch mindestens eine halbe bzw. ganze mechanische Drehung, bevor sie Verbesserungen für AMR- bzw. GMR/TMR-Technologien bereitstellen können. Unmittelbar nach dem Start und bei sehr langsamen Drehzahlen könnten VHALL-basierte Sensoren also eine bessere Winkelgenauigkeit bieten als xMR-basierte Sensoren. Daher werden in der vorliegenden Offenbarung auch optimale Winkelschätzer aus kombinierten xMR- und VHALL-basierten Sensoren vorgeschlagen, die den Status der Autokalibrierung und die Winkelgeschwindigkeit berücksichtigen.

[0104] Zu diesem Zweck kann die Vergleichsschaltungsanordnung 130 um zusätzliche Funktionen zur Signalkombination erweitert werden. Die Vergleichsschaltungsanordnung 130 kann so ausgebildet sein, dass sie ein erstes Messsignal y_a der physikalischen Größe 102 von einem ersten Sensor im Signalpfad 110A in Übereinstimmung mit einer ersten Sensortechnologie empfängt und mindestens ein zweites Messsignal y_b der physikalischen Größe 102 von einem zweiten Sensor im Signalpfad 110A in Übereinstimmung mit einer zweiten Sensortechnologie empfängt. Die Messsignale können in Übereinstimmung mit einer der zuvor beschriebenen Ausführungsformen verzögerungskompensiert oder zeitlich ausgerichtet werden. Die Vergleichsschaltung 130 kann so ausgebildet sein, dass sie eine Schätzung der physikalischen Größe auf der Grundlage einer Kombination aus dem ersten und dem zweiten Messsignal y_a , y_b berechnet. Die Kombination hängt von der erwarteten Genauigkeit des ersten und des zweiten Sensors ab. Bei einigen Ausführungsbeispielen ist das erste Messsignal y_a eine erste Winkelschätzung von einem ersten Winkelsensor in Übereinstimmung mit einer ersten Winkelsensortechnologie und das zweite Messsignal y_b eine zweite Winkelschätzung von einem zweiten Winkelsensor in Übereinstimmung mit einer zweiten Winkelsensortechnologie. Wie bereits erwähnt, kann die erste Winkelsensortechnologie eine xMR-basierte Sensortechnologie sein, während die zweite Sensortechnologie eine VHALL-basierte Sensortechnologie sein kann. Der Fachmann, der von der vorliegenden Offenbarung profitiert, wird jedoch erkennen, dass Ausführungsbeispiele der

vorliegenden Offenbarung weder auf die Winkelerfassung noch auf diese Kombination von Sensoren beschränkt sind. Das Prinzip lässt sich auf das Erfassen beliebiger physikalischer Größen anwenden.

[0105] Zum besseren Verständnis zeigt **Fig. 10** ein Blockdiagramm einer Vorrichtung 1000 zur Winkelerfassung gemäß den Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung.

[0106] Die Vorrichtung 1000 umfasst eine Schnittstelle 1010, die so ausgebildet ist, dass sie ein erstes Winkelmesssignal 120A von einem ersten Winkelsensor 111A in Übereinstimmung mit einer ersten Winkelsensortechnologie (z.B. xMR) empfängt und mindestens ein zweites Winkelmesssignal 120B von einem zweiten Winkelsensor 111B in Übereinstimmung mit einer zweiten Sensortechnologie (z.B. VHALL) empfängt. Der erste Winkelsensor 111A kann Teil eines ersten Signalpfades 110A eines funktionalen sicheren Systems sein. Der zweite Winkelsensor 111B kann Teil eines zweiten Signalpfades 110B des funktionalen sicheren Systems sein. Die Vorrichtung 1000 umfasst ferner einen Prozessor 1020, der so ausgebildet ist, dass er eine Schätzung des Winkels auf der Grundlage einer Kombination aus dem ersten und dem zweiten Winkelmesssignal 120A, 120B berechnet. Die Kombination ist abhängig von der erwarteten Genauigkeit des ersten und des zweiten Winkelsensors 111A, 111B.

[0107] Der Prozessor 1020 kann so ausgebildet sein, dass er das erste und das zweite Winkelmesssignal in Abhängigkeit von einer aktuellen Winkelgeschwindigkeit und/oder von einem jeweiligen Status des ersten und des zweiten Winkelsensors 111A, 111B kombiniert. Zu diesem Zweck kann die Schnittstelle 1010 so ausgebildet sein, dass sie ein erstes Statussignal 1030A von dem ersten Sensor 111A und ein zweites Statussignal 1030B von dem zweiten Winkelsensor 111B empfängt. Die Statussignale 1030A, 1030B können auf die jeweiligen beobachteten Winkelgeschwindigkeiten und/oder Kalibrierungszustände der Winkelsensoren 111A, 111B hinweisen.

[0108] Wie bereits erwähnt, ist das vorgeschlagene Konzept nicht auf die Erfassung von Winkeln beschränkt, sondern lässt sich auf die Erfassung beliebiger physikalischer Größen anwenden.

[0109] Der Prozessor 1020 kann so ausgebildet sein, dass er die einzelnen Sensorsignale 120A, 120B auf der Grundlage ihrer erwarteten Genauigkeit gewichtet. Bei xMR-basierten Sensoren beispielsweise kann die Genauigkeit allein vom Status der Autokalibrierung (aktiv oder inaktiv) abhängen, nicht aber von der Drehzahl, da sie im Allgemeinen ein hervorragendes Signal-Rausch-Verhältnis aufweisen.

$$\text{error}_{xMR} = \begin{cases} \text{error}_{xMR_init}, & \text{if autocal is inactive} \\ \text{error}_{MR_ac}, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

[0110] Für VHALL-basierte Sensoren kann die Genauigkeit durch die Genauigkeit für statische Messungen und einen Faktor proportional zur Winkelgeschwindigkeit modelliert werden, der die erhebliche Mittelungszeit berücksichtigt, die für ein angemessenes Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) erforderlich ist.

$$\text{error}_{BHALL} = \text{error}_{VHall_0} + \omega \cdot T_{eff} \quad (2)$$

[0111] In einer Beispielimplementierung kann die Winkelgeschwindigkeit ω aus dem Finite-Differenz-Quotienten zweier Winkelabstastwerte abgeleitet werden, z. B. vom VHALL-basierten Winkelsensor 111B. Wie bereits erwähnt, könnte der VHALL-basierte Winkelsensor 111B eine beträchtliche Mittelungszeit, T_{av} , benötigen, um ein angemessenes SNR zu erreichen. Natürlich ist das Ausgangswinkelsignal 120B des Sensors unempfindlich gegenüber Änderungen der Winkelgeschwindigkeit, die schneller als T_{av} auftreten können. Bei sehr langsamen Drehzahlen können die daraus resultierenden Ungenauigkeiten vernachlässigbar sein, bei schnelleren Drehzahlen jedoch immer mehr an Bedeutung gewinnen. Der Einfachheit halber wird vorgeschlagen, T_{eff} einem bestimmten konstanten Bruchteil von T_{av} zuzuordnen, z. B. $T_{eff} = T_{av}/4$.

[0112] Der Prozessor 1020 kann so ausgebildet sein, dass er mit zunehmender Winkelgeschwindigkeit ω eine rechnerische Gewichtung des ersten Winkelmesssignals 120A vom xMR-Sensor 111A gegenüber dem zweiten Winkelmesssignal 120B vom VHALL-Sensor 111B erhöht. Entsprechend kann der Prozessor 1020 so ausgebildet sein, dass er mit abnehmender Winkelgeschwindigkeit ω das Gewicht des zweiten Winkelmesssignals 120B vom VHALL-Sensor 111B gegenüber dem ersten Winkelmesssignal 120A vom xMR-Sensor 111A erhöht.

[0113] Bei einem Ausführungsbeispiel kann das Gewichtungsschema eine rein binäre Gewichtung sein, die nur die Winkelschätzung angle_out mit der besseren erwarteten Genauigkeit ausgibt. Eine entsprechende Ausführungsform des Kombinationsprozessors 1020 ist in **Fig. 11** dargestellt.

[0114] Der Kombinationsprozessor 1020 empfängt das erste Winkelmesssignal 120A und das erste Statussignal 1030A von dem xMR-Sensor 111A sowie das zweite Winkelmesssignal 120B und das zweite Statussignal 1030B von dem VHALL-Sensor 111B. Basierend auf dem ersten Winkelmesssignal 120A und dem Statussignal 1030A kann in einem ersten Genauigkeitsschätzer 1021A ein erster Fehlerwert error_xMR bestimmt werden, beispielsweise gemäß Gl. (1). Basierend auf dem zweiten Winkelmesssignal 120B und dem zweiten Statussignal 1030B kann in einem zweiten Genauigkeitsschätzer 1021B ein zweiter Fehlerwert error_VHall bestimmt werden, zum Beispiel gemäß Gl. (2). Die Fehlersignale error_xMR und error_VHall können mit einem Komparator 1022 verglichen werden. Auf der Grundlage dieses Vergleichs kann das erste Winkelmesssignal 120A durch den Selektor 1023 als Ausgangssignal angle_out ausgewählt werden, wenn $\text{error_xMR} < \text{error_VHall}$ ist, oder das zweite Winkelmesssignal 120B kann als Ausgangssignal angle_out ausgewählt werden, wenn $\text{error_xMR} > \text{error_VHall}$ ist.

[0115] Ein deutlich verbessertes Gewichtungsschema verwendet ein geeignetes Filter, z. B. ein Kalman-Filter, siehe **Fig. 12**.

[0116] In **Fig. 12** umfasst der Prozessor 1020 ein Kalman-Filter 710, das so ausgebildet ist, dass es die Winkelschätzung unter Verwendung des ersten und des zweiten Messsignals 120A, 120B, die mit entsprechenden Messfehlern verfälscht sind, berechnet. Wie zuvor beschrieben, umfasst das Kalman-Filter 710 ein Systemmodell 711, das die Zeitabhängigkeit der interessierenden Größen - hier der magnetische Winkel und seine zeitlichen Ableitungen bis zu einer geeigneten Ordnung, d. h. Winkelgeschwindigkeit ω , Winkelbeschleunigung usw. - und ihre Beziehung zu den Beobachtungsgrößen - den Sensorausgängen angle_xMR 120A und angle_VHall 120B - beschreibt. Das Kalman-Filter berücksichtigt ausdrücklich die Genauigkeit jeder abgetasteten Beobachtungsgröße über die Kovarianz des Messrauschens. Eine optimale Signalgewichtung zwischen dem xMR-basierten Sensor 111A, dem VHALL-basierten Sensor 111B und den bereits erfassten Informationen im Systemmodell 711 wird dann automatisch durch den Kalman-Prozess bereitgestellt.

[0117] Ein für die meisten Anwendungen geeignetes Systemmodell 711 kann einen zweidimensionalen Zustandsraum und eine minimale Differentialgleichung aufweisen, gegeben in Gl.(1). Dabei ist φ der Winkel, ω die Winkelgeschwindigkeit und der Punkt bezeichnet die zeitliche Ableitung. Sie enthält die implizite Annahme, dass die Winkelgeschwindigkeit konstant bleibt. Modelle höherer Ordnung sind natürlich möglich und folgen im Wesentlichen dem gleichen Formalismus wie unten beschrieben.

$$\begin{aligned} x &= \begin{pmatrix} \varphi \\ \omega \end{pmatrix}, \\ \dot{x} &= \begin{pmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega \\ 0 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (1)$$

[0118] Ein lineares Systemmodell in der üblichen Konvention ist angegeben in Gleichung (2). Dabei bezeichnet u einen Steuereingang (im Beispielsfall unnötig), y ist der Vektor der Beobachtungsgrößen $y = (\text{angle_xMR}, \text{angle_VHall})^T$, \tilde{A} , B , C , und D sind die Matrizen, die die Zustandsübergänge, den Einfluss der Steuerung und die Messungen beschreiben. Das Prozessrauschen wird durch den Vektor w modelliert, dessen Kovarianzmatrix als \tilde{Q} bezeichnet wird, und das Messrauschen durch v , dessen Kovarianzmatrix mit R bezeichnet wird. Beide Rauschterme werden als Gaußsches Rauschen mit dem Mittelwert Null modelliert.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \tilde{A} \cdot x + \tilde{B} \cdot u + w, \\ y &= C \cdot x + D \cdot u + v. \end{aligned} \quad (2)$$

[0119] Für das dargestellte Beispiel können die Systemmatrizen wie folgt identifiziert werden

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \tilde{B} = D = 0. \quad (3)$$

[0120] Da die Fehler der beiden unterschiedlichen Winkelsensor-Technologien unabhängig sind, verschwinden die Off-Diagonal-Elemente der Kovarianzmatrix des Messrauschens, und die Matrix ist gegeben durch

$$R = \begin{pmatrix} \text{error_xMR}^2 & 0 \\ 0 & \text{error_VHall}^2 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

[0121] Bei Prozessrauschen reicht es aus, die Unsicherheit bei der Ausbreitung von ω zu modellieren. Wir finden also

$$\tilde{Q} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \dot{\omega}_{\max}^2 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

mit der maximalen Winkelbeschleunigung $\dot{\omega}_{\max}$.

[0122] Obwohl es nicht notwendig ist, kann es sinnvoll sein, die erwarteten Fehler error_xMR und error_VHall mit den bereits verfügbaren Informationen aus dem Systemmodell 711 zu berechnen und sie an die Genauigkeitsschätzer 1021A, 1021B zurückzuleiten. Es wird daher vorgeschlagen, das ω aus dem Systemmodell 711 zu verwenden, siehe Gl. (1), um den error_VHall zu berechnen mit Gl. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..

[0123] Für diskrete Systeme mit endlicher Abtastzeit T_s kann die Zustandsdarstellung jedoch durch endliche Differenzen wie folgt gegeben sein

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= A \cdot x_k + B \cdot u_k + w_k, \\ y_k &= C \cdot x_k + D \cdot u_k + v_k. \end{aligned} \quad (6)$$

[0124] In dieser Darstellung unterscheiden sich die Systemmatrizen geringfügig und sind gegeben durch

$$A = \begin{pmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = D = 0. \quad (7)$$

[0125] Äquivalent dazu kann die Kovarianzmatrix des Prozessrauschens angepasst werden, führend zu

$$Q = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & (T_s \cdot \dot{\omega}_{\max})^2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

[0126] Die Kovarianzmatrix des Messrauschens, R , bleibt dieselbe wie beim kontinuierlichen Modell.

[0127] Natürlich beruht das diskrete Modell auf der gleichen impliziten Annahme wie das kontinuierliche Modell, nämlich dass die Winkelgeschwindigkeit konstant bleibt. Dies ist einigermaßen gerechtfertigt, solange der Fehler aufgrund der maximalen Winkelbeschleunigung $\left| T_s^2 \cdot \dot{\omega}_{\max} / 2 \right|$ im Vergleich zu der angestrebten Winkelgenauigkeit gering ist.

[0128] Für die Herleitung der Kalman-Gleichungen wird auf die Literatur verwiesen. Für jeden Abtastwert wird im Allgemeinen

1. das Ergebnis des Systemmodells vorhergesagt über Gleichung (9),
2. die Mess-Abtastwerte y_k werden erhalten und
3. das Systemmodell wird aktualisiert über Gl. (10).

[0129] Kalman-Vorhersage:

$$\bar{x}_k = A \cdot x_{k-1}, \quad \bar{P}_k = A \cdot P_{k-1} \cdot A^T + Q. \quad (9)$$

[0130] Kalman-Aktualisierung:

$$K_k = \frac{\bar{P}_k \cdot C^T}{C \cdot \bar{P}_k \cdot C^T + R}, \quad x_k = \bar{x}_k + K_k \cdot (y_k - C \cdot \bar{x}_k), \quad P_k = (I - K_k) \quad (10)$$

[0131] Die erwarteten Genauigkeiten der xMR- und der VHall-basierten Winkelsensoren 111A, 111B bestimmen die Kovarianzmatrix der Messung, die zur Berechnung der Kalman-Verstärkung K_k verwendet wird. Die Kalman-Verstärkung wiederum kann die Gewichte bestimmen, die den jeweiligen Mess-Abtastwerten $y_k = (\text{angle_xMR}, \text{angle_VHall})^T$ zugeordnet sind.

[0132] Natürlich sollten die Winkel φ_k und $\bar{\varphi}_k$ 360° -periodisch sein. Daher müssen die meisten Zuweisungen in den obigen Gleichungen auf 360° und die Subtraktionen auf $\pm 180^\circ$ geschrieben werden.

[0133] Bei herkömmlichen Systemen kann die Winkelgenauigkeit von AMR-Sensoren ohne Autokalibrierung (d. h. direkt nach dem Start, bei sehr langsamen Drehungen und bei Start-Stopp-Anwendungen) unzureichend sein, um die hohen Genauigkeitsanforderungen zu erfüllen. Die Ausführungsbeispiele können es ermöglichen, ein besseres Produkt mit geeigneten Winkelgenauigkeiten in allen relevanten Anwendungsfällen zu entwickeln.

[0134] Die Aspekte und Merkmale, die zusammen mit einem oder mehreren der vorangehend detaillierten Beispiele und Figuren erwähnt und beschrieben sind, können auch mit einem oder mehreren der anderen Beispiele kombiniert werden, um ein gleiches Merkmal des anderen Beispiels zu ersetzen oder um das Merkmal in das andere Beispiel zusätzlich einzuführen.

[0135] Beispiele können weiterhin ein Computerprogramm, das einen Programmcode zum Ausführen eines oder mehrerer der vorangehenden Verfahren aufweist, wenn das Computerprogramm auf einem Computer oder Prozessor ausgeführt wird, sein oder sich auf ein solches beziehen. Schritte, Operationen oder Prozesse von verschiedenen, vorangehend beschriebenen Verfahren können durch programmierte Computer oder Prozessoren ausgeführt werden. Beispiele können auch Programmspeichervorrichtungen, wie beispielsweise Digitaldatenspeichermedien, abdecken, die maschinen-, prozessor- oder computerlesbar sind und maschinenausführbare, prozessorausführbare oder computerausführbare Programme von Anweisungen codieren. Die Anweisungen führen einige oder alle der Schritte der vorangehend beschriebenen Verfahren aus oder verursachen deren Ausführung. Die Programmspeichervorrichtungen können z. B. Digital-speicher, magnetische Speichermedien wie beispielsweise Magnetplatten und Magnetbänder, Festplattenlaufwerke oder optisch lesbare Digitaldatenspeichermedien umfassen oder sein. Weitere Beispiele können auch Computer, Prozessoren oder Steuereinheiten, die zum Ausführen der Schritte der vorangehend beschriebenen Verfahren programmiert sind, oder (feld-)programmierbare Logik-Arrays ((F)PLAs; (Field) Programmable Logic Arrays) oder (feld-)programmierbare Gate-Arrays ((F)PGA; (Field) Programmable Gate Arrays), die zum Ausführen der Schritte der vorangehend beschriebenen Verfahren programmiert sind, abdecken.

[0136] Die Beschreibung und Zeichnungen stellen nur die Grundsätze der Offenbarung dar. Weiterhin sollen alle hier aufgeführten Beispiele grundsätzlich ausdrücklich nur darstellenden Zwecken dienen, um den Leser bei dem Verständnis der Grundsätze der Offenbarung und der durch den (die) Erfinder beigetragenen Konzepte zur Weiterentwicklung der Technik zu unterstützen. Alle Aussagen hierin über Grundsätze, Aspekte und Beispiele der Offenbarung sowie konkrete Beispiele derselben sollen deren Entsprechungen umfassen.

[0137] Ein als „Mittel für...“ bezeichneter Funktionsblock, der eine bestimmte Funktion ausführt, kann sich auf eine Schaltung beziehen, die zum Ausführen einer bestimmten Funktion ausgebildet ist. Somit kann ein „Mittel für etwas“ als ein „Mittel ausgebildet für oder geeignet für etwas“ implementiert sein, z. B. eine Vorrichtung oder eine Schaltung, die ausgebildet ist für oder geeignet ist für die jeweilige Aufgabe.

[0138] Funktionen verschiedener in den Figuren gezeigter Elemente einschließlich jeder als „Mittel“, „Mittel zum Bereitstellen eines Signals“, „Mittel zum Erzeugen eines Signals“, etc. bezeichneter Funktionsblöcke kann in Form dedizierter Hardware, z. B. „eines Signalanbieters“, „einer Signalverarbeitungseinheit“, „eines Prozessors“, „einer Steuerung“ etc. sowie als Hardware fähig zum Ausführen von Software in Verbindung mit zugehöriger Software implementiert sein. Bei Bereitstellung durch einen Prozessor können die Funktionen durch einen einzelnen dedizierten Prozessor, durch einen einzelnen gemeinschaftlich verwendeten Prozessor oder durch eine Mehrzahl von individuellen Prozessoren bereitgestellt sein, von denen einige oder von denen alle gemeinschaftlich verwendet werden können. Allerdings ist der Begriff „Prozessor“ oder „Steuerung“ bei Weitem nicht auf ausschließlich zur Ausführung von Software fähige Hardware begrenzt, sondern kann Digitalsignalprozessor- (DSP; Digital Signal Processor) Hardware, Netzwerkprozessor, anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC; Application Specific Integrated Circuit), feldprogrammierbares Gate-Array (FPGA; Field Programmable Gate Array), Nurlesespeicher (ROM; Read Only Memory) zum Speichern von Software, Direktzugriffsspeicher (RAM; Random Access Memory) und nichtflüchtige

Speicherung (storage) umfassen. Sonstige Hardware, herkömmliche und/oder kundenspezifische, kann auch umfasst sein.

[0139] Ein Blockdiagramm kann zum Beispiel ein detailliertes Schaltdiagramm darstellen, das die Grundsätze der Offenbarung implementiert. Auf ähnliche Weise können ein Flussdiagramm, ein Ablaufdiagramm, ein Zustandsübergangdiagramm, ein Pseudocode und dergleichen verschiedene Prozesse, Operationen oder Schritte repräsentieren, die zum Beispiel im Wesentlichen in einem computerlesbaren Medium dargestellt und so durch einen Computer oder Prozessor ausgeführt werden können, ungeachtet dessen, ob ein solcher Computer oder Prozessor explizit gezeigt ist. In der Beschreibung oder in den Patentansprüchen offenbarte Verfahren können durch eine Vorrichtung implementiert werden, die Mittel zum Ausführen eines jeden der jeweiligen Schritte dieser Verfahren aufweist.

[0140] Es versteht sich, dass die Offenbarung mehrerer, in der Beschreibung oder den Ansprüchen offenbarter Handlungen, Prozesse, Operationen, Schritte oder Funktionen nicht als in der bestimmten Reihenfolge befindlich ausgelegt werden soll, sofern dies nicht explizit oder implizit anderweitig, zum Beispiel aus technischen Gründen, angegeben ist. Daher werden diese durch die Offenbarung von mehreren Schritten oder Funktionen nicht auf eine bestimmte Reihenfolge begrenzt, es sei denn, dass diese Schritte oder Funktionen aus technischen Gründen nicht austauschbar sind. Ferner kann bei einigen Beispielen ein einzelner Schritt, Funktion, Prozess oder Operation mehrere Teilschritte, -funktionen, -prozesse oder -operationen einschließen und/oder in dieselben aufgebrochen werden. Solche Teilschritte können umfasst sein und Teil der Offenbarung dieses Einzelschritts sein, sofern sie nicht explizit ausgeschlossen sind.

[0141] Weiterhin sind die folgenden Ansprüche hiermit in die detaillierte Beschreibung aufgenommen, wo jeder Anspruch als getrenntes Beispiel für sich stehen kann. Während jeder Anspruch als getrenntes Beispiel für sich stehen kann, ist zu beachten, dass - obwohl ein abhängiger Anspruch sich in den Ansprüchen auf eine bestimmte Kombination mit einem oder mehreren anderen Ansprüchen beziehen kann - andere Beispiele auch eine Kombination des abhängigen Anspruchs mit dem Gegenstand jedes anderen abhängigen oder unabhängigen Anspruchs umfassen können. Solche Kombinationen werden hier explizit vorgeschlagen, sofern nicht angegeben ist, dass eine bestimmte Kombination nicht beabsichtigt ist. Ferner sollen auch Merkmale eines Anspruchs für jeden anderen unabhängigen Anspruch eingeschlossen sein, selbst wenn dieser Anspruch nicht direkt abhängig von dem unabhängigen Anspruch gemacht ist.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zum Vergleichen eines ersten Signals und eines zweiten Signals, die Vorrichtung umfassend
 - einen ersten Signalpfad für ein erstes Messsignal einer physikalischen Größe, wobei der erste Signalpfad eine erste Signallaufzeitverzögerung aufweist;
 - einen zweiten Signalpfad für ein zweites Messsignal der physikalischen Größe, wobei der zweite Signalpfad eine zweite Signallaufzeitverzögerung aufweist, die sich von der ersten Signallaufzeitverzögerung unterscheidet;
 - eine Verzögerungskompensationsschaltung, die so ausgebildet ist, dass sie eine Differenz zwischen der ersten und der zweiten Signalausbreitungsverzögerung kompensiert, um ein verzögerungskompensiertes erstes und zweites Messsignal zu erzeugen; und
 - eine Vergleichsschaltung, die so ausgebildet ist, dass sie das verzögerungskompensierte erste und zweite Messsignal vergleicht.
2. Die Vorrichtung gemäß Anspruch 1, wobei der erste und der zweite Signalpfad jeweilige Sensorelemente umfassen, die so ausgebildet sind, dass sie die physikalische Größe in das erste und das zweite Messsignal umwandeln, wobei die jeweiligen Sensorelemente und/oder die jeweiligen weiteren Schaltungskomponenten des ersten und des zweiten Signalpfades die jeweiligen unterschiedlichen Signalausbreitungsverzögerungen verursachen.
3. Die Vorrichtung gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Verzögerungskompensationsschaltung so ausgebildet ist, dass sie eine erste Signalverarbeitung des ersten Signalpfades und eine zweite Signalverarbeitung des zweiten Signalpfades zu unterschiedlichen Zeitpunkten auslöst, um das verzögerungskompensierte erste und zweite Messsignal an den jeweiligen Ausgängen des ersten und des zweiten Signalpfades zu erhalten.

4. Die Vorrichtung gemäß Anspruch 3, wobei eine Differenz zwischen einer ersten Auslösezeit für den ersten Signalpfad und einer zweiten Auslösezeit für den zweiten Signalpfad auf einer Differenz zwischen der ersten und der zweiten Signallaufzeitverzögerung und/oder unterschiedlichen Abtastperioden basiert, die im ersten und zweiten Signalpfad verwendet werden.

5. Die Vorrichtung gemäß Anspruch 3 oder 4, wobei die Verzögerungskompensationsschaltung so ausgebildet ist, dass sie den ersten Signalpfad früher auslöst als den zweiten Signalpfad, wenn die erste Signallaufzeitverzögerung länger ist als die zweite Signallaufzeit, oder umgekehrt.

6. Die Vorrichtung gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Verzögerungskompensationsschaltung eine Filterschaltung aufweist, die so ausgebildet ist, dass sie ein gefiltertes Messsignal für mindestens einen des ersten oder zweiten Signalpfades erzeugt, wobei das gefilterte Messsignal mit dem Messsignal des anderen Signalpfades zeitlich ausgerichtet ist.

7. Die Vorrichtung gemäß Anspruch 6, wobei die Filterschaltung im ersten oder zweiten Signalpfad ein FIR-Filter, Finite Impulse Response, mit einer Filterverzögerung aufweist, die einer Differenz zwischen der ersten und der zweiten Signallaufzeit entspricht.

8. Die Vorrichtung gemäß Anspruch 7, wobei das FIR-Filter in dem Signalpfad mit der kürzeren Signallaufzeitverzögerung umfasst ist.

9. Die Vorrichtung gemäß Anspruch 6, wobei die Filterschaltung ein erstes FIR-Filter in dem ersten Signalpfad und ein zweites FIR-Filter in dem zweiten Signalpfad umfasst, wobei eine Summe der ersten Ausbreitungsverzögerung und einer ersten Filterverzögerung des ersten FIR-Filters gleich einer Summe der zweiten Ausbreitungsverzögerung und einer zweiten Filterverzögerung des zweiten FIR-Filters ist.

10. Die Vorrichtung gemäß Anspruch 6, wobei die Filterschaltung in dem ersten oder zweiten Signalpfad ein Vorhersagefilter mit einem Vorhersagezeitintervall aufweist, das einer Differenz zwischen der ersten und der zweiten Signallaufzeitverzögerung entspricht.

11. Die Vorrichtung gemäß Anspruch 10, wobei das Vorhersagefilter einen Kalman-Filter umfasst.

12. Die Vorrichtung gemäß Anspruch 10 oder 11, wobei das Vorhersage-Filter in dem Signalpfad mit der längeren Signallaufzeitverzögerung umfasst ist.

13. Die Vorrichtung gemäß Anspruch 6, wobei die Filterschaltung ein erstes Vorhersage-Filter in dem ersten Signalpfad und ein zweites Vorhersage-Filter in dem zweiten Signalpfad umfasst, wobei eine Summe der ersten Ausbreitungsverzögerung und eines ersten Vorhersagezeitintervalls des ersten Vorhersage-Filters gleich einer Summe der zweiten Ausbreitungsverzögerung und eines zweiten Vorhersagezeitintervalls des zweiten Vorhersage-Filters ist.

14. Die Vorrichtung gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Vergleichsschaltung so ausgebildet ist, dass sie einen Sicherheitsalarm auslöst, wenn das verzögerungskompensierte erste und zweite Messsignal um mehr als einen vordefinierten Schwellenwert voneinander abweichen.

15. Die Vorrichtung gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, ferner umfassend eine Schnittstelle, die so ausgebildet ist, dass sie das verzögerungskompensierte erste Messsignal von einem ersten Sensor gemäß einer ersten Sensortechnologie empfängt und das verzögerungskompensierte zweite Messsignal von einem zweiten Sensor gemäß einer zweiten Sensortechnologie empfängt; und einen Prozessor, der so ausgebildet ist, dass er eine Schätzung der physikalischen Größe auf der Grundlage einer Kombination des verzögerungskompensierten ersten und zweiten Messsignals berechnet, wobei die Kombination von einer erwarteten Genauigkeit des ersten und des zweiten Sensors abhängig ist.

16. Die Vorrichtung gemäß Anspruch 15, wobei der Prozessor so ausgebildet ist, dass er das erste und das zweite Messsignal in Abhängigkeit von einer aktuellen Änderungsrate der physikalischen Größe und/oder von einem jeweiligen Status des ersten und des zweiten Sensors kombiniert.

17. Ein Verfahren zum Vergleichen eines ersten Signals und eines zweiten Signals, das Verfahren umfassend Bereitstellen eines ersten Messsignals einer physikalischen Größe über einen ersten Signalpfad mit einer

ersten Signallaufzeitverzögerung,
 Bereitstellen eines zweiten Messsignals der physikalischen Größe über einen zweiten Signalpfad mit einer ersten Signallaufzeitverzögerung, die sich von der ersten Signallaufzeitverzögerung unterscheidet;
 Kompensieren einer Differenz zwischen der ersten und zweiten Signallaufzeitverzögerung, um ein verzögerungskompensiertes erstes und zweites Messsignal zu erzeugen; und
 Vergleichen des verzögerungskompensierten ersten und zweiten Messsignals.

18. Eine Vorrichtung zum Erfassen einer physikalischen Größe, die Vorrichtung umfassend eine Schnittstelle, die so ausgebildet ist, dass sie ein erstes Messsignal der physikalischen Größe von einem ersten Sensor gemäß einer ersten Sensortechnologie empfängt und mindestens ein zweites Messsignal der physikalischen Größe von einem zweiten Sensor gemäß einer zweiten Sensortechnologie empfängt; und
 einen Prozessor, der so ausgebildet ist, dass er eine Schätzung der physikalischen Größe auf der Grundlage einer Kombination des ersten und des zweiten Messsignals berechnet, wobei die Kombination von einer erwarteten Genauigkeit des ersten und des zweiten Sensors abhängig ist.

19. Die Vorrichtung gemäß Anspruch 18, wobei das erste Messsignal ein erstes Winkelmesssignal von einem ersten Winkelsensor gemäß einer ersten Winkelsensortechnologie ist und wobei das zweite Messsignal ein zweites Winkelmesssignal von einem zweiten Winkelsensor gemäß einer zweiten Winkelsensortechnologie ist.

20. Die Vorrichtung gemäß Anspruch 19, wobei der Prozessor so ausgebildet ist, dass er das erste und das zweite Winkelmesssignal in Abhängigkeit von einer aktuellen Winkelgeschwindigkeit und/oder von einem jeweiligen Status des ersten und des zweiten Winkelsensors kombiniert.

21. Die Vorrichtung gemäß Anspruch 19 oder 20, wobei der Prozessor so ausgebildet ist, dass er eine Gewichtung des ersten Winkelmesssignals in Bezug auf das zweite Winkelmesssignal mit zunehmender Winkelgeschwindigkeit erhöht und wobei der Prozessor so ausgebildet ist, dass er eine Gewichtung des zweiten Winkelmesssignals in Bezug auf das erste Winkelmesssignal mit abnehmender Winkelgeschwindigkeit erhöht.

22. Die Vorrichtung gemäß einem der Ansprüche 18 bis 21, wobei der Prozessor so ausgebildet ist, dass er das Messsignal mit der besten erwarteten Genauigkeit als Schätzung ausgibt.

23. Die Vorrichtung gemäß einem der Ansprüche 18 bis 21, wobei der Prozessor ein Kalman-Filter umfasst, das so ausgebildet ist, dass es die Schätzung unter Verwendung des ersten und des zweiten Messsignals, die mit entsprechenden Messfehlern verfälscht sind, berechnet.

24. Die Vorrichtung gemäß einem der Ansprüche 19 bis 23, wobei der erste Winkelsensor einen magnetoresistiven Winkelsensor aufweist und der zweite Winkelsensor einen vertikalen Hall-Sensor aufweist.

25. Die Vorrichtung gemäß Anspruch 24, wobei die erwartete Genauigkeit des magnetoresistiven Winkelsensors von einem Autokalibrierungsaktivierungsstatus des magnetoresistiven Winkelsensors abhängt und wobei die erwartete Genauigkeit des vertikalen Hallsensors von einer aktuellen Winkelgeschwindigkeit abhängt.

26. Die Vorrichtung gemäß einem der Ansprüche 18 bis 25, ferner umfassend eine Vergleichsschaltungsanordnung, die so ausgebildet ist, dass sie das erste und das zweite Messsignal vergleicht und auf der Grundlage des Vergleichs einen Indikator für funktionale Sicherheit ausgibt.

27. Die Vorrichtung gemäß einem der Ansprüche 18 bis 26, ferner umfassend einen ersten Signalpfad für das erste Messsignal, wobei der erste Signalpfad eine erste Signallaufzeitverzögerung aufweist;
 einen zweiten Signalpfad für das zweite Messsignal, wobei der zweite Signalpfad eine zweite Signallaufzeitverzögerung aufweist, die sich von der ersten Signallaufzeitverzögerung unterscheidet; und
 eine Verzögerungskompensationsschaltung, die so ausgebildet ist, dass sie eine Differenz zwischen der ersten und der zweiten Signalausbreitungsverzögerung kompensiert, um ein verzögerungskompensiertes erstes und zweites Messsignal zu erzeugen,
 wobei der Prozessor so ausgebildet ist, dass er die Schätzung auf der Grundlage einer Kombination aus dem verzögerungskompensierten ersten und zweiten Messsignal berechnet.

28. Die Vorrichtung gemäß Anspruch 27, wobei die Verzögerungskompensationsschaltung so ausgebildet ist, dass sie eine erste Signalverarbeitung des ersten Signalpfades und eine zweite Signalverarbeitung des zweiten Signalpfades zu unterschiedlichen Zeitpunkten auslöst, um das verzögerungskompensierten erste und zweite Messsignal an den jeweiligen Ausgängen des ersten und des zweiten Signalpfades zu erhalten.

29. Die Vorrichtung gemäß einem der Ansprüche 27 oder 28, wobei die Verzögerungskompensationsschaltung eine Filterschaltung aufweist, die so ausgebildet ist, dass sie ein gefiltertes Messsignal für mindestens einen des ersten oder zweiten Signalpfades erzeugt, wobei das gefilterte Winkelmesssignal mit dem Messsignal des anderen Signalpfades zeitlich ausgerichtet ist.

30. Ein Verfahren zum Erfassen einer physikalischen Größe, das Verfahren umfassend
Empfangen eines ersten Messsignals der physikalischen Größe von einem ersten Sensor gemäß einer ersten Sensortechnologie,
Empfangen mindestens eines zweiten Messsignals der physikalischen Größe von einem zweiten Sensor gemäß einer zweiten Sensortechnologie; und
Berechnen einer Schätzung der physikalischen Größe auf der Grundlage einer Kombination des ersten und des zweiten Messsignals, wobei die Kombination von einer erwarteten Genauigkeit des ersten und des zweiten Sensors abhängig ist.

Es folgen 11 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

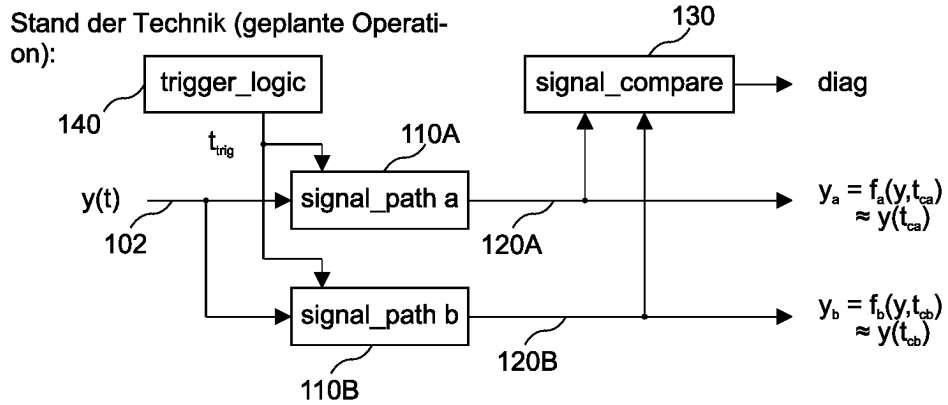


FIG. 1A

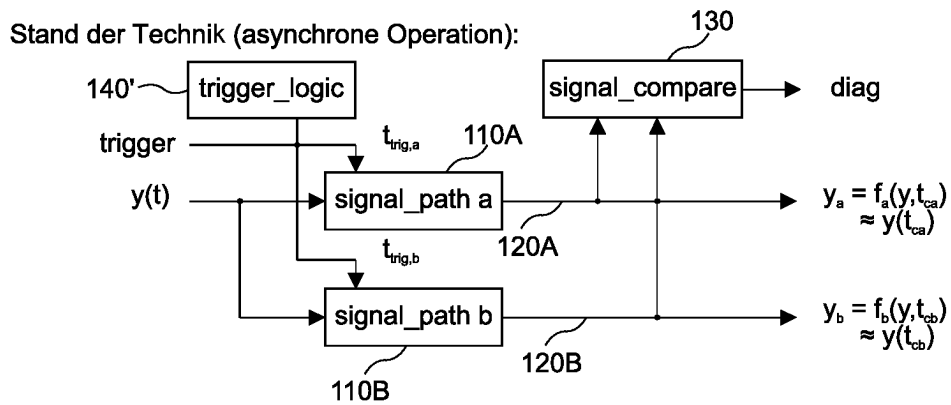


FIG. 1B

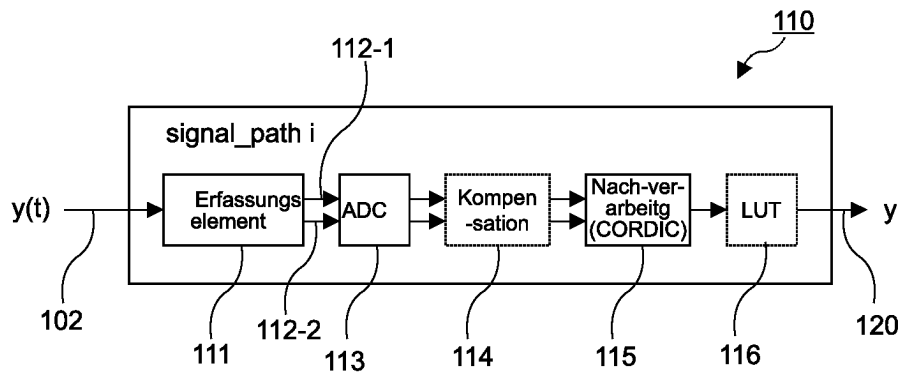


FIG. 1C

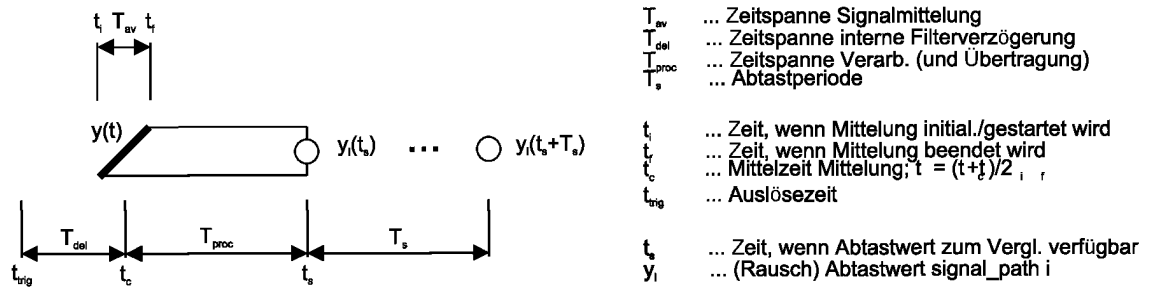


FIG. 2A

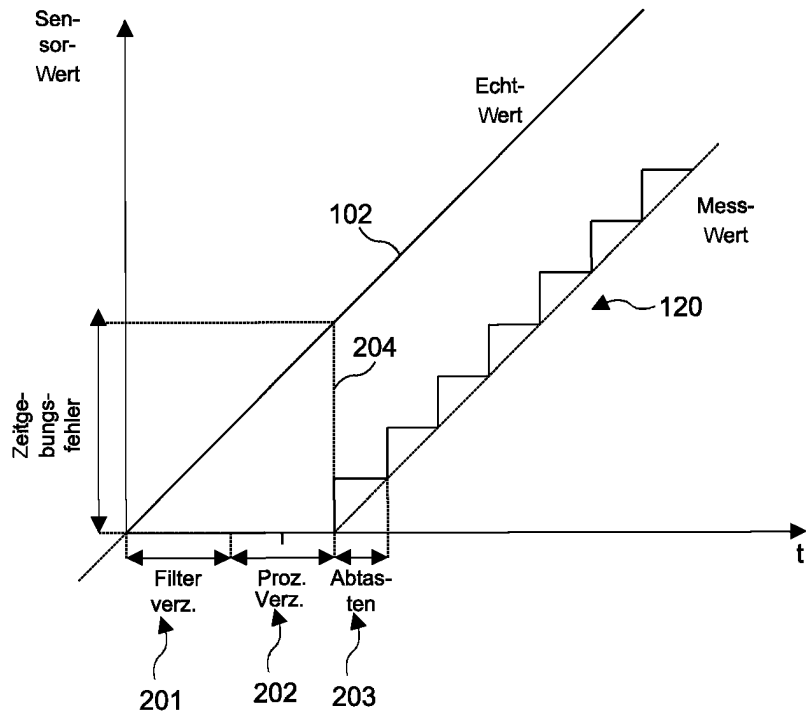


FIG. 2B

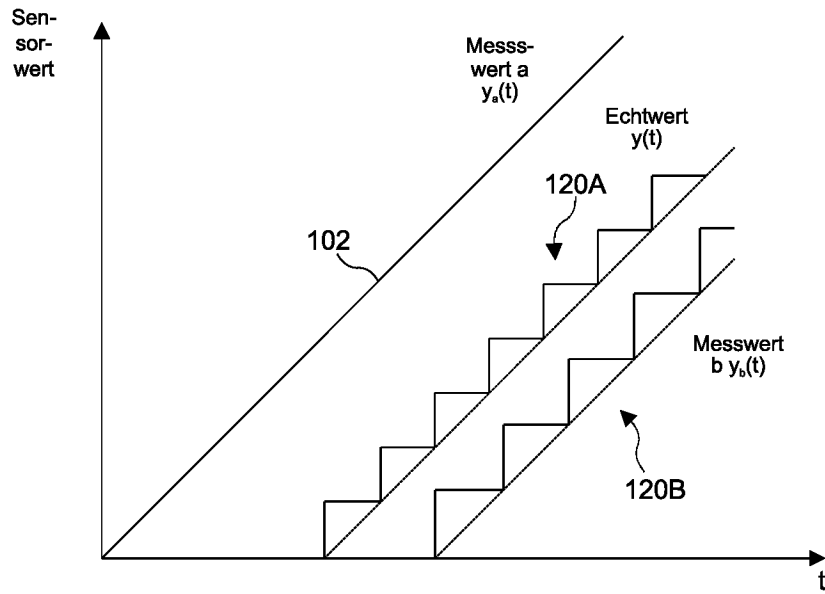


FIG. 2C

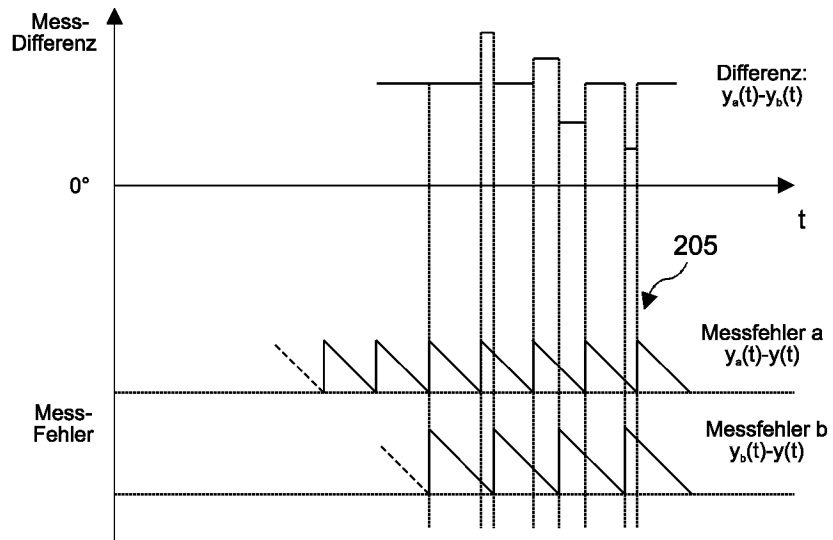


FIG. 2D

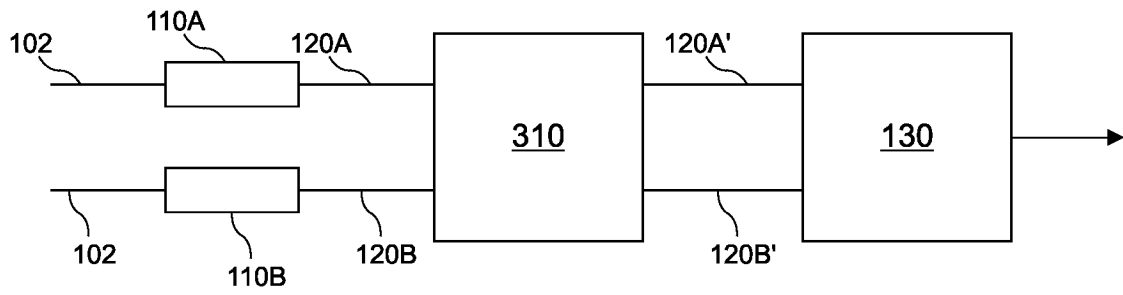


FIG. 3

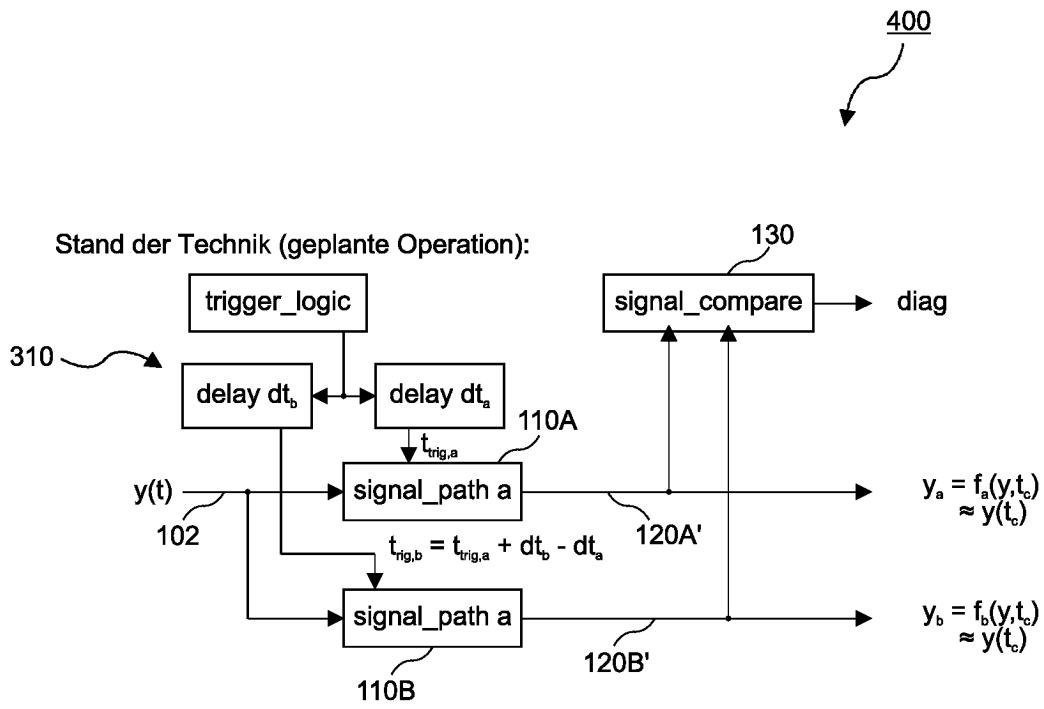


FIG. 4A

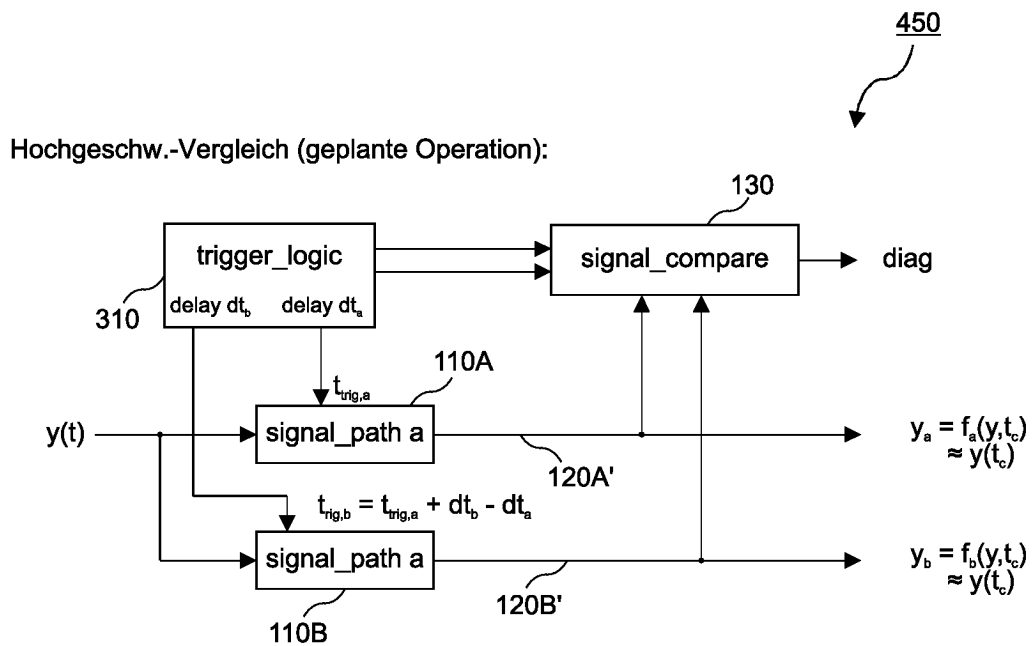


FIG. 4B

Hochgeschw.-Vergleich (asynchrone Operation):

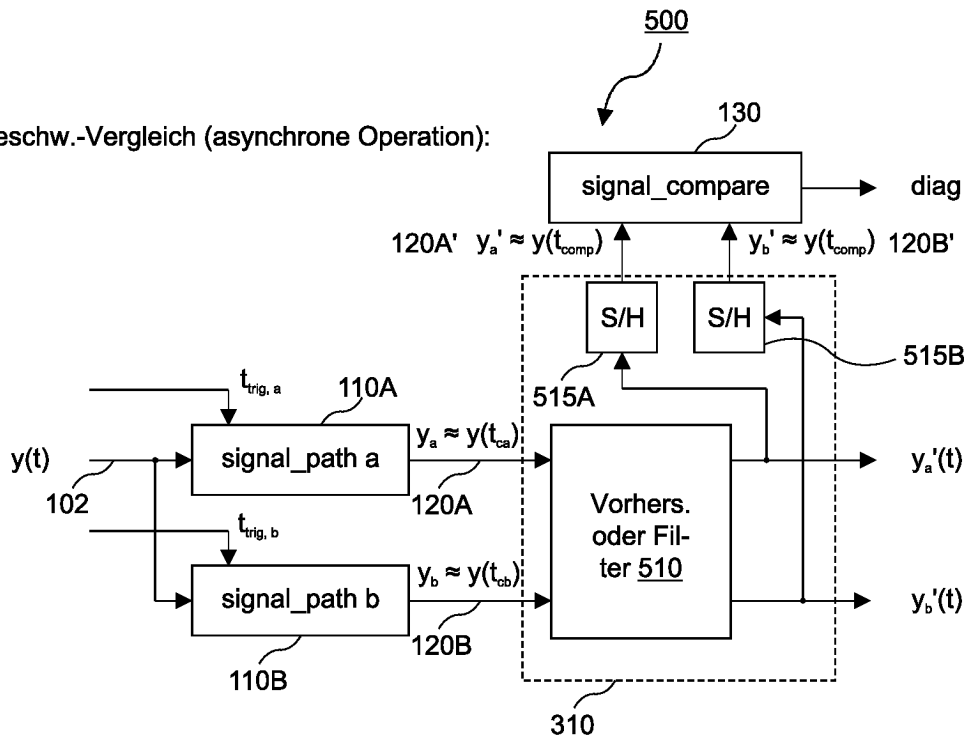


FIG. 5A

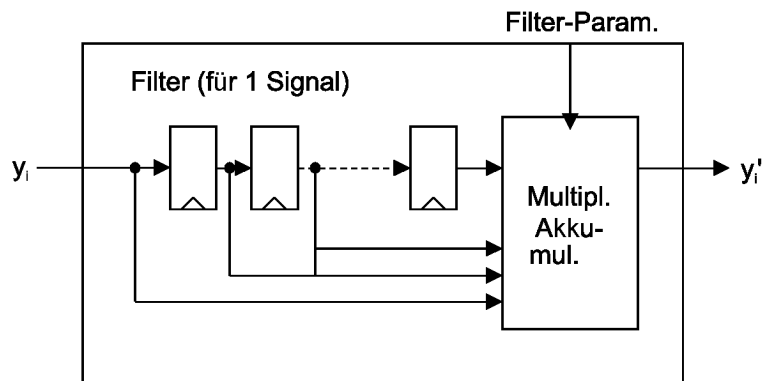


FIG. 5B

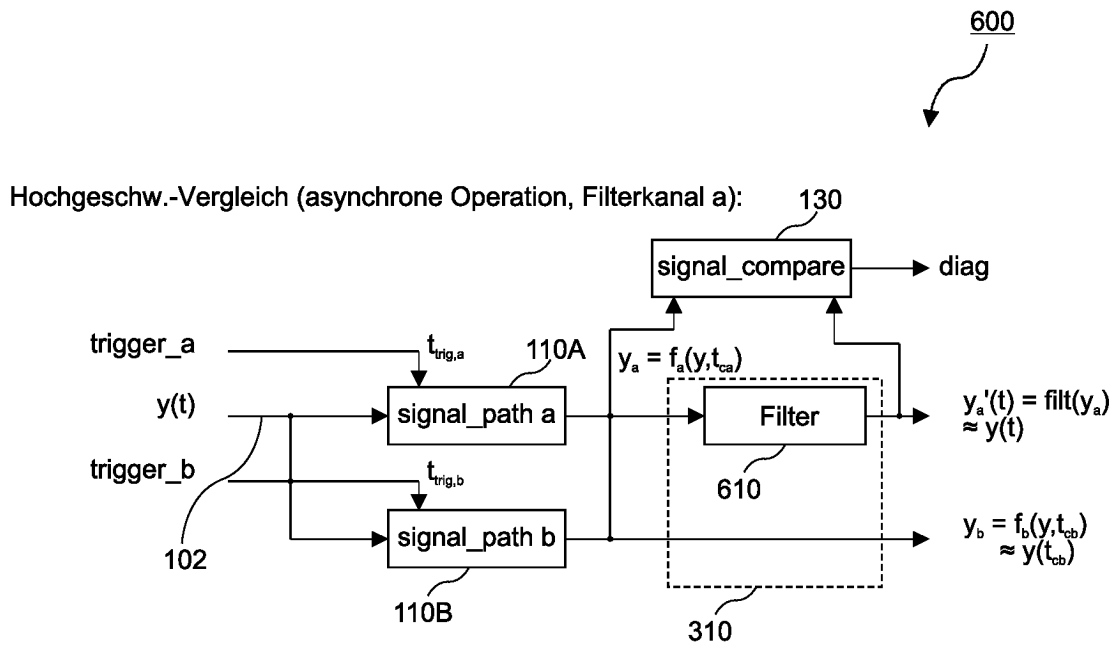


FIG. 6A

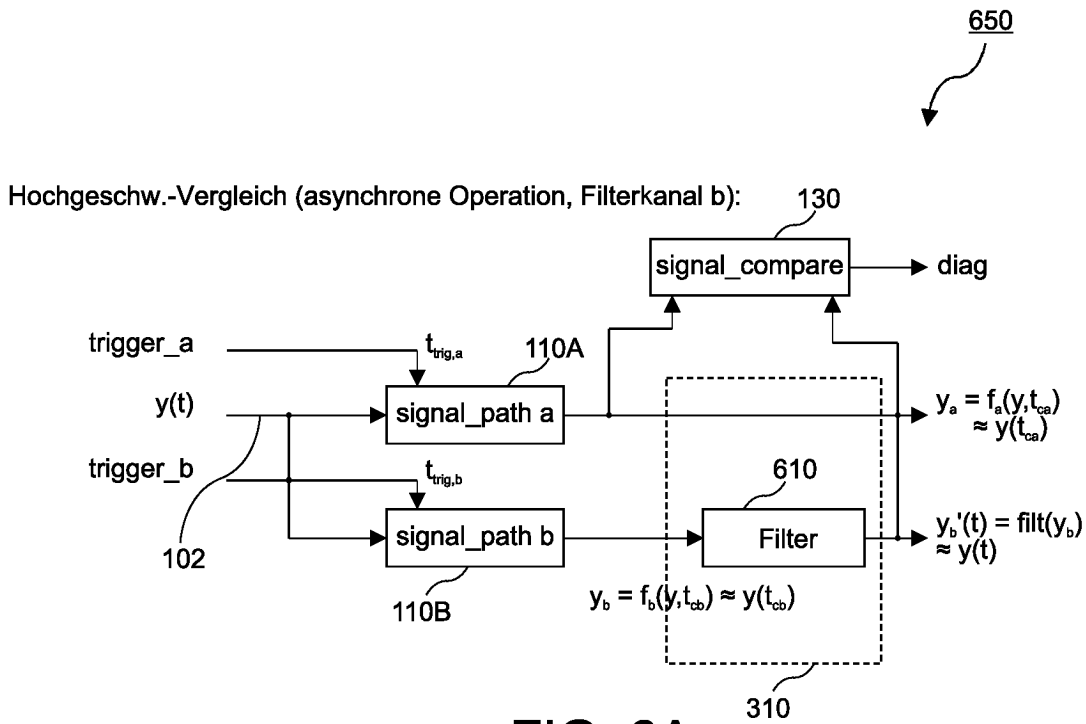


FIG. 6A

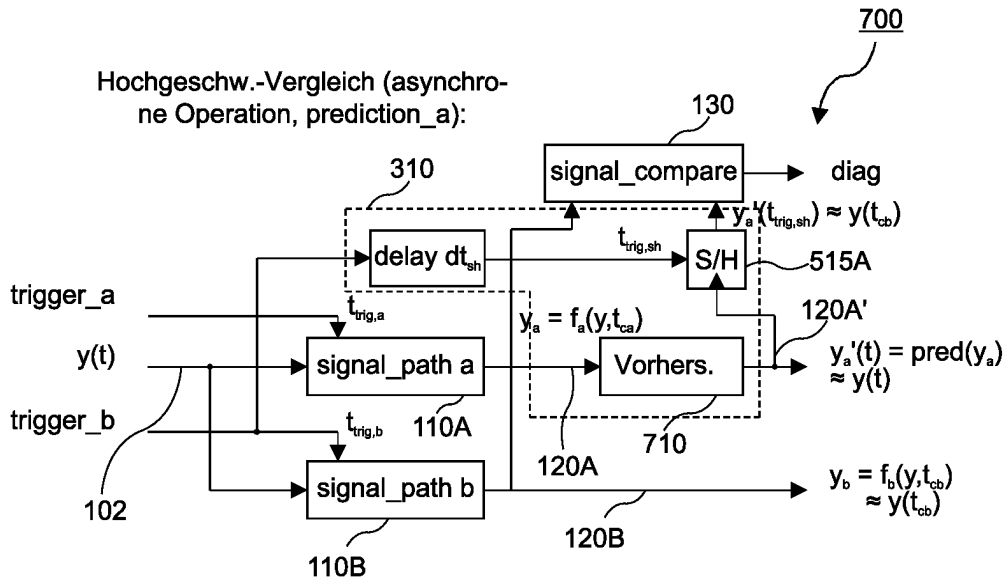


FIG. 7A

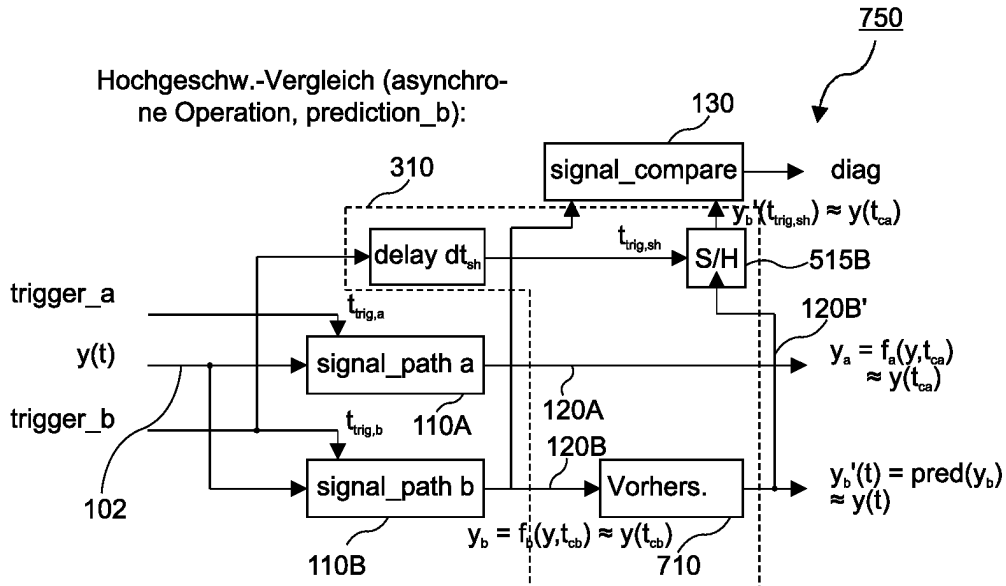


FIG. 7B

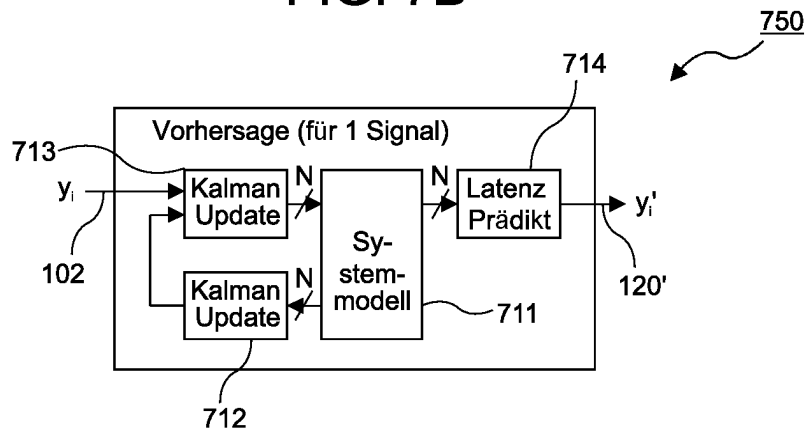


FIG. 7C

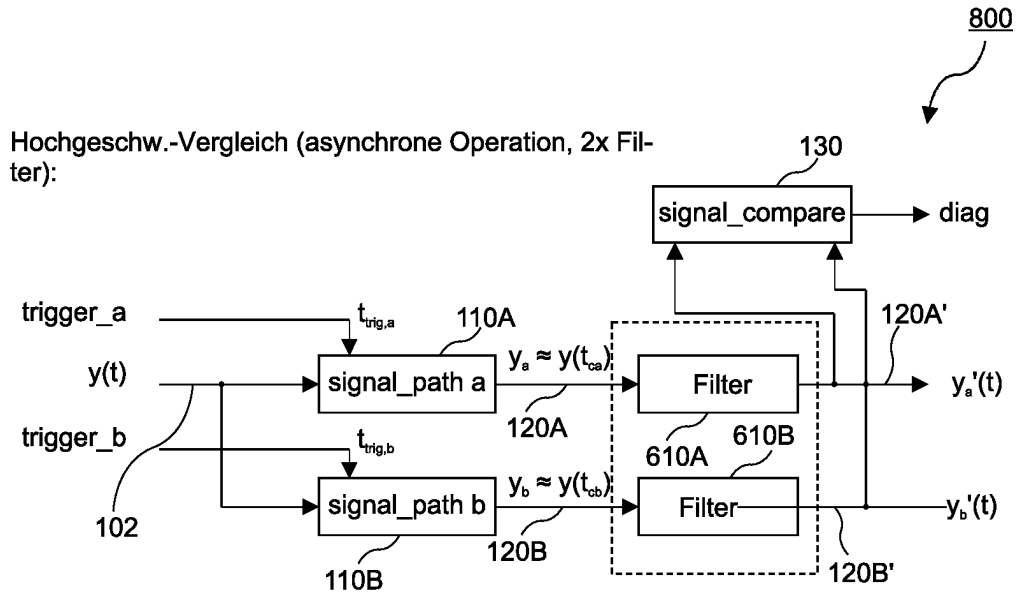


FIG. 8A

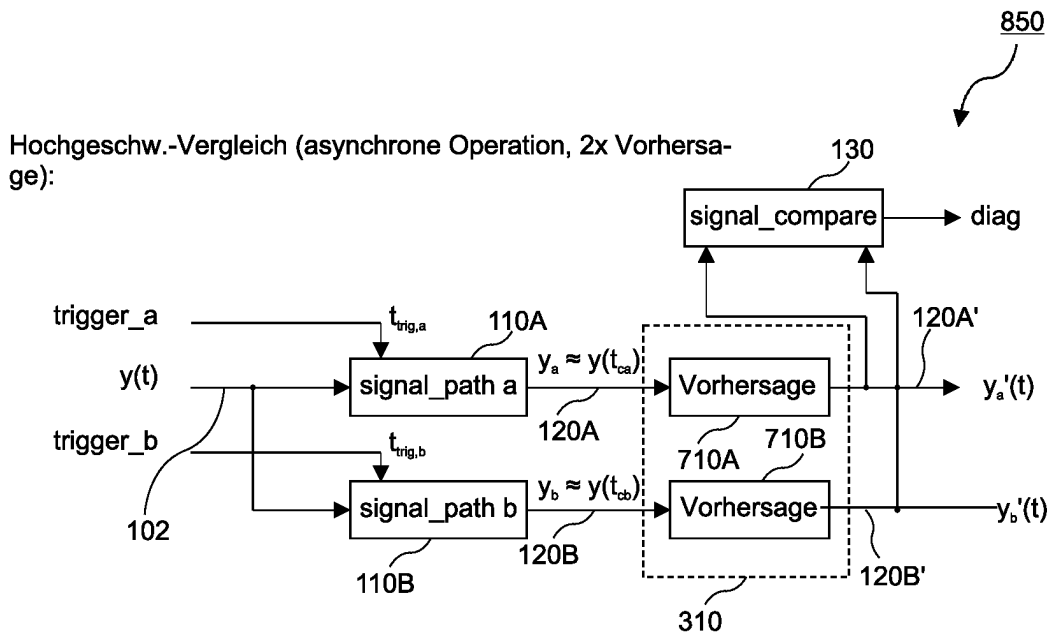


FIG. 8B

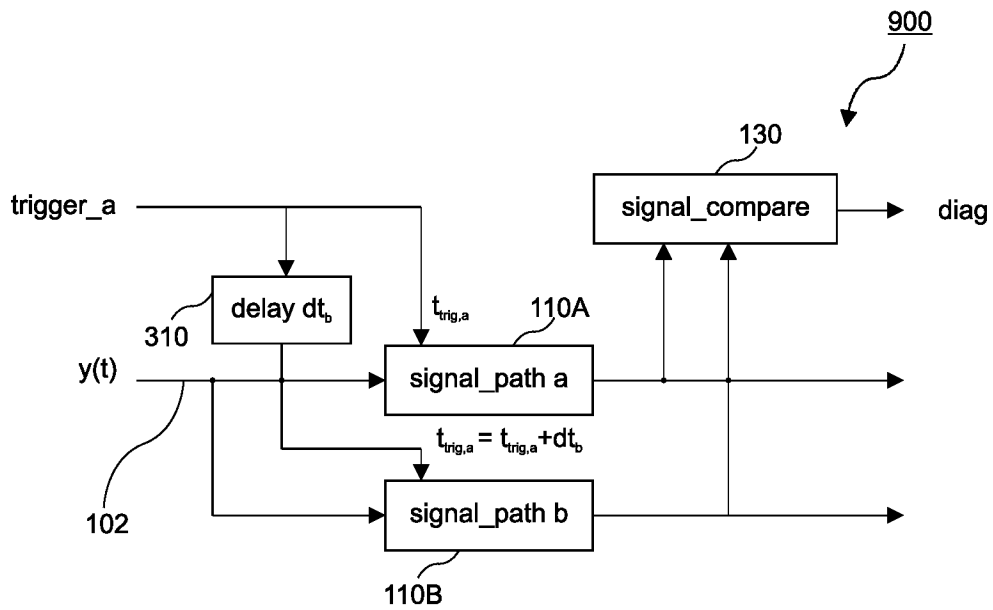


FIG. 9

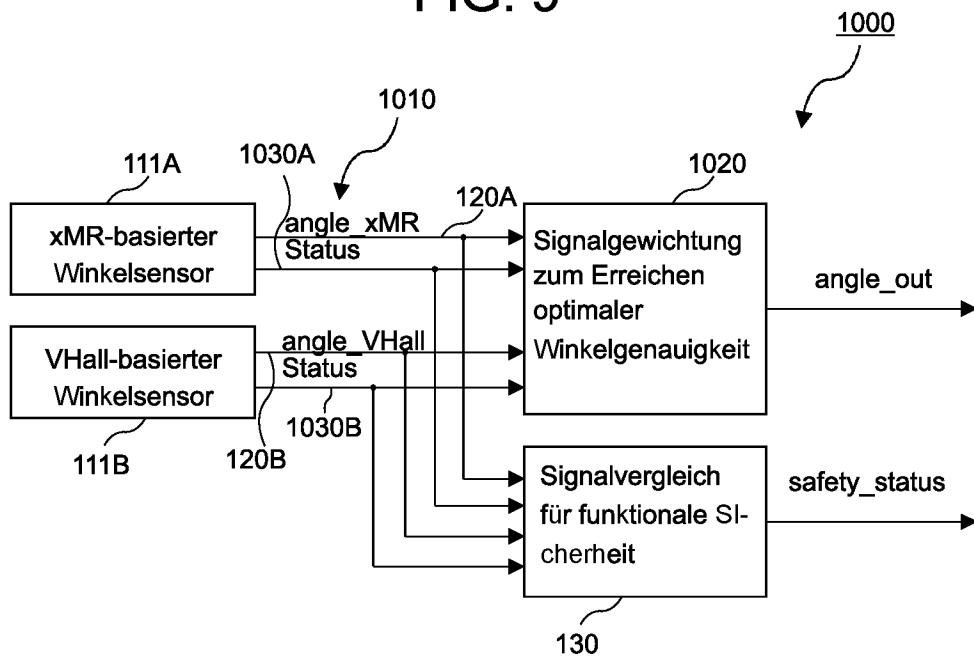


FIG. 10

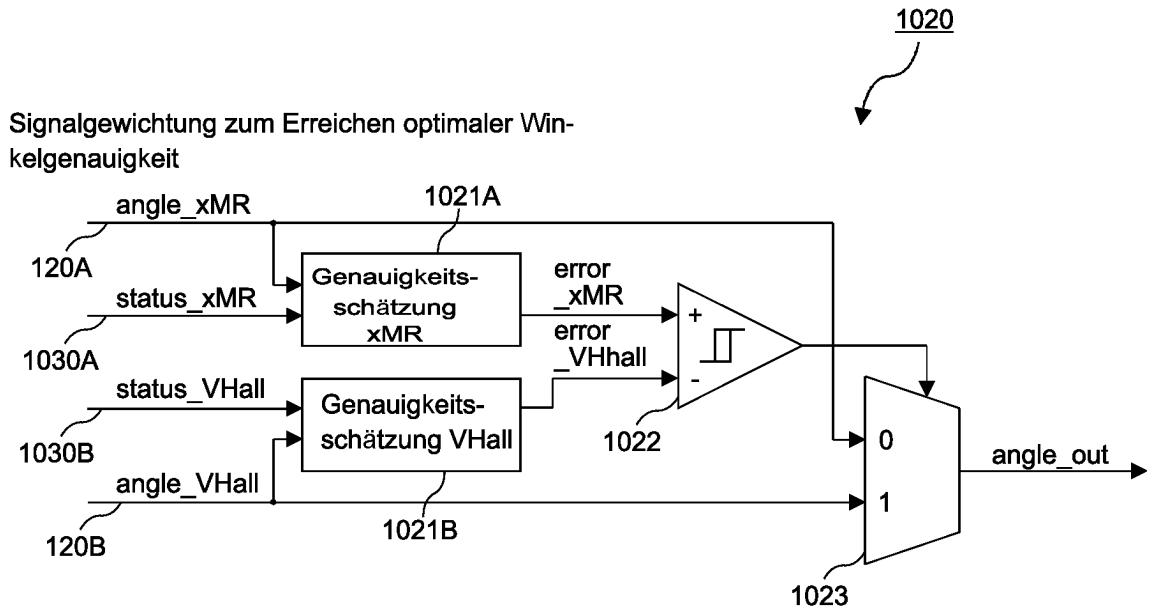


FIG. 11

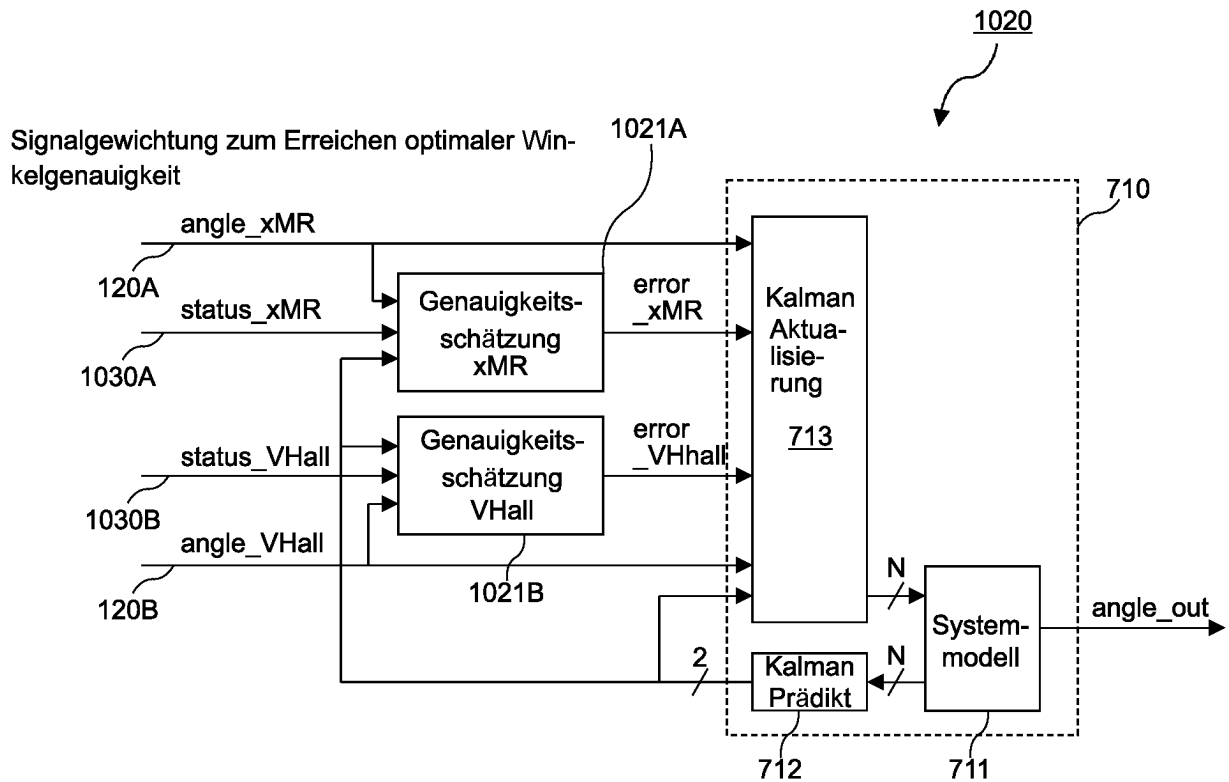


FIG. 12