

Bestimmung einer absoluten Laufzeit von Signalen

BESCHREIBUNG

5

TECHNISCHES GEBIET

Die Offenbarung betrifft ein Computer implementiertes Verfahren zur Bestimmung einer absoluten Laufzeit eines Signals, sowie entsprechend ein System zur Datenverarbeitung, ein
10 Computerprogramm und ein computerlesbares Medium.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

Chips, welche aus einem Startsignal einem Stoppsignal eine Laufzeit ermitteln, sind bekannt.
15 EP0829734B1 beschreibt eine Methode zur Bestimmung der Laufzeit und wie ein Startsignal und ein Stoppsignal erzeugt werden können. In Figur 1 ist die Funktionsweise dieses konventionellen Ansatzes gezeigt. Eingeleitet wird die Laufzeitmessung durch einen Impuls 28. Eine erste Schwellwertspannung 29 wird eingestellt, so dass in dem in Figur 1 gezeigten Fall die zweite negative Halbwelle einer Gruppe von Schwingungen eines Empfangssignals 300
20 detektiert wird. Ein Laufzeitzähler wird mit dem auf die detektierte Halbwelle folgenden Nulldurchgang, in Figur 1 durch einen Kreis 31 markiert, gestoppt. Dazu werden mit einer steigenden Flanke 32 eines Ausgangssignals 33, eines ersten Komparators ein Signal zur Freigabe des Stoppeingangs an dem Laufzeitzähler erzeugt und einer steigenden Flanke 34 eines Ausgangssignal 35 eines zweiten Komparators wird der Laufzeitzähler gestoppt. Eine auf
25 diese Weise gemessene Zeit $t_l + t_{offs}$ wird um einen schaltungs- und sensorabhängigen Zeit Offset t_{offs} rechnerisch reduziert, um die eigentliche Laufzeit t_l des Signals zu erhalten.

Es hat sich jedoch gezeigt, dass die ersten Amplituden eines Signals nicht die volle Amplitude aufweisen und dadurch kann der in EP0829734B1 beschriebene Komparator je nach
30 Schwellwert eine Flanke erzeugen oder nicht. Dadurch ist unbekannt, ob die gemessene Zeit der wirklichen Laufzeit des Signals entspricht. Dies gilt in besonderem Maße für Signale mit Einschwingverhalten, wie etwa bei Signalen, bei denen eine Masse zum Schwingen angeregt wird, wie etwa bei Ultraschallsignalen. Ebenso gilt dies insbesondere bei dynamischen Ankopplungen von Signalen, wie etwa an einem lebenden Organismus. Dort kann das ein
35 Einschwingverhalten variabel sein und die gemessenen Laufzeiten können zudem eine Ungenauigkeit haben, welche abhängig von der Frequenz des Signals und des Mediums ist.

Durch den konventionellen Ansatz ist die Bestimmung von absoluten Laufzeiten bei Ultraschallsignalen beispielsweise in der Medizin nicht oder nicht verlässlich oder nicht ausreichend möglich.

- 5 Die nicht verlässliche oder ungenaue Bestimmung einer absoluten Laufzeit von Signalen hat aber auch Auswirkungen für andere technische Anwendungen. So können elektromagnetische Signale dadurch nicht klar und eindeutig von Störungen unterschieden werden, wie etwa bei LIDAR oder Parksensoren von Kraftfahrzeugen.

10 KURZBESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

Ausgehend von dem eingangs genannten Stand der Technik liegt der Offenbarung die Aufgabe zugrunde, eine Methode zu finden, mit der die absolute Laufzeit von Signalen verlässlicher, und insbesondere unabhängig von einem Einschwingverhalten, bestimmt werden kann.

- 15 Die Aufgabe wird gelöst mit einem Computer implementierten Verfahren gemäß des unabhängigen Anspruchs 1, mit einem System zur Datenverarbeitung gemäß des unabhängigen Anspruchs 14, mit einem Computerprogramm gemäß des unabhängigen Anspruchs 15, und mit einem computerlesbaren Medium gemäß des unabhängigen Anspruchs 20 16. Bevorzugte Ausführungsformen sind in den abhängigen Ansprüchen, in der Beschreibung und in den Figuren beschrieben.

- Entsprechend der erfindungsgemäßen Lösung wird ein Verfahren vorgeschlagen zur Bestimmung einer absoluten Laufzeit eines Signals, wobei das Verfahren umfasst: Empfangen 25 einer Signalsequenz, die Signalsequenz umfassend: ein erstes Signal mit einer ersten Signalfrequenz und einer ersten Anzahl an Perioden des ersten Signals mit der ersten Signalfrequenz, und ein auf das erste Signal folgende zweite Signal mit einer zweiten Signalfrequenz, wobei die zweite Signalfrequenz von der ersten Signalfrequenz verschieden ist; Bestimmen eines Zeitpunkts eines Signalübergangs von dem empfangenen ersten Signal zu dem empfangenen zweiten Signal; und Bestimmen der absoluten Laufzeit des ersten Signals 30 seit einem der Signalsequenz zugeordneten Start-Zeitpunkts unter Verwendung des bestimmten Zeitpunkts für den Signalübergang von dem empfangenen ersten Signal zu dem empfangenen zweiten Signal und der Anzahl an Perioden des ersten Signals.

- 35 Dadurch, dass die absolute Laufzeit des ersten Signals unter Verwendung des bestimmten Zeitpunkts für den Signalübergang von dem empfangenen ersten Signal zu dem empfangenen zweiten Signal bestimmt wird, kann die absolute Laufzeit von Signalen verlässlicher, und

insbesondere unabhängig von einem Einschwingverhalten, bestimmt werden. Erfindungsgemäße Aspekte erlauben, dass aussagekräftige absolute Laufzeiten von echten Signalen (und nicht von Störungen) bestimmt werden können. Bevorzugter Aspekte der Offenbarung sind robust gegenüber variablem Einschwingverhalten. Mit Aspekten der beanspruchten Lösung können auch hohe Genauigkeiten bei der Bestimmung der absoluten Laufzeit erzielt werden. Insbesondere können mit erfindungsgemäßen Aspekten kleinste Änderungen in einem Medium erfasst werden durch die das Signal propagiert. Dies liegt insbesondere daran, dass ein Übergang zwischen zwei Signalen mit verschiedenen Frequenzen mit hoher Genauigkeit bestimmt werden kann.

10

So umfasst bevorzugt das Bestimmen des Zeitpunkts des Signalübergangs von dem empfangenen ersten Signal zu dem empfangenen zweiten Signal Folgendes: für jede Periode zumindest eines Teils des empfangenen ersten Signals und eines Teils des empfangenen zweiten Signals, Bestimmen einer Laufzeit der Periode seit dem Start-Zeitpunkt für die Signalsequenz; Bestimmen von Differenzen der bestimmten Laufzeiten (unmittelbar oder mittelbar) aufeinanderfolgender Perioden des ersten Signals und des zweiten Signals; Bestimmen des Zeitpunkts des Signalübergangs von dem empfangenen ersten Signal zu dem empfangenen zweiten Signal basierend auf einem Bestimmen des Zeitpunkts an dem die bestimmten Differenzen der bestimmten Laufzeiten (unmittelbar oder mittelbar) aufeinanderfolgender Perioden zwischen der Periodendauer des ersten Signals und der Periodendauer des zweiten Signals wechseln. Dadurch, dass ein Wechsel der Periodendauer von Schwingungen von der Periodendauer des ersten Signals zu der Periodendauer des zweiten Signals mit hoher Verlässlichkeit und hoher Genauigkeit bestimmt werden kann, wird durch diese weiteren optionalen Merkmale ein Beitrag zu einer besonders verlässlichen und genauen Bestimmung der absoluten Laufzeit erzielt.

Bevorzugt wird die absolute Laufzeit des ersten Signals seit dem Start-Zeitpunkt für die Signalsequenz bestimmt durch den bestimmten Zeitpunkt für den Signalübergang von dem ersten Signal zu dem zweiten Signal, korrigiert durch einen ersten zeitlichen Korrekturterm, der auf der Anzahl der Perioden des ersten Signals basiert, vorzugsweise wobei der erste Korrekturterm das Produkt aus der Anzahl der Perioden des ersten Signals und der Periodendauer des ersten Signals umfasst. Durch die Bestimmung des Frequenzübergangs wird bekannt, dass ein Frequenzwechsel nach N Perioden aus der Signalerzeugung resultiert. Die bestimmte Zeit des Frequenzübergangs bzw. des Übergangs zwischen den beiden Signalen kann also mit der Anzahl der Perioden der ersten Frequenz des ersten, vorauslaufenden Signals derart korrigiert werden, dass die absolute Laufzeit der Zeitpunkt des Übergangs zwischen den Signalen abzüglich dem Produkt aus Anzahl der Perioden des ersten Signals und

der Periodendauer des ersten Signals entspricht, wobei zusätzliche sich durch den Übergang der Signale (z.B. Zeitspanne zwischen den Signalen, keine vollen Perioden eines Signals bis zum Übergang, etc.) ergebende zeitliche Korrekturen berücksichtigt werden können. Diese weiteren optionalen Merkmale liefern einen Beitrag zu einer noch verlässlichen und genaueren

5 Bestimmung der absoluten Laufzeit des Signals.

Gemäß eines weiteren bevorzugten Aspekts, kann das Verfahren umfassen: Verstärken der empfangenen Signalsequenz vor dem Bestimmen des Zeitpunkts des Signalübergangs von dem empfangenen ersten Signal zu dem empfangenen zweiten Signal. Diese Verstärkung kann die

10 Steilheit der Signalfanken erhöhen und die Wahrscheinlichkeit reduzieren, dass die gemessenen absoluten Laufzeiten durch eine Signalamplitude beeinflusst werden. So kann eine Verstärkung insbesondere in den gesättigten Bereich sicherstellen, dass die absolute Laufzeit, insbesondere das Stoppsignal, gänzlich unabhängig von der Signalamplitude ist.

15 Das Verfahren kann bevorzugt ein Umwandeln der vorzugsweise verstärkten Signalsequenz in ein binäres Signal umfassen, vorzugsweise wobei das Umwandeln mittels eines Komparators, vorzugsweise einem Schmitt-Trigger, erfolgt. Solche Operatoren, insbesondere Schmitt Trigger mit logischen Gattern, verstärken die Steilheit des den Start-Zeitpunkt definierenden Startsignals als auch des Stoppsignals für die Messung der Laufzeit einer Periode. Die

20 Signalfanken können mittels einer Hysterese solcher Komparatoren eindeutiger und steiler ausgestaltet werden.

Erfindungsgemäße Aspekte erlauben eine Skalierung auf beliebig viele Laufzeitmessungen, wobei ein Frequenzübergang zwischen zwei Signalen für die Bestimmung einer absoluten

25 Laufzeit verwendet werden kann.

Bevorzugt kann das erfindungsgemäße Verfahren auch das Aussenden bzw. Generieren, und ggf. zuvor optionale Verstärken, der Signalsequenz umfassen. Das Aussenden bzw. Generieren und/oder das Empfangen des Signals kann ein Umwandeln eines Ultraschallsignals oder

30 elektromagnetischen Signals in ein elektrisches Signal umfassen.

Die hier beschriebene Signalsequenz ist bevorzugt elektrisch. Andere Signalarten sind denkbar. Auch können andere Signalarten, wie Ultraschallsignale, elektromagnetische Signale, elektrostatische Signale oder magnetischen Signale, in die vorzugsweise elektrische

35 Signalsequenz konvertiert werden. Auch können Aktoren, die mit dieser Signalsequenz betrieben werden, verschiedene sein. z.B. Ultraschall, LED, Laser, Spule (magnetisch), Kondensator (elektrostatisches Feld), etc.

Jedes der hier beschriebenen Signale kann eine (quasi-)harmonische Welle sein.

5 Sofern diese Kurzbeschreibung der Offenbarung Merkmale beschreibt, die nicht in den
Patentansprüchen aufgeführt sind, so stellen diese Merkmale keine wesentlichen Merkmale in
dem Sinne dar, dass diese Merkmale zwangsläufig zur Beschreibung der Erfindung in die
Patentansprüche aufzunehmen sind, jedoch sind diese Merkmale besonders prominente
bevorzugte Realisierungen der beanspruchten Erfindung, können mit jedem der
Patentansprüche kombiniert werden und können auch untereinander beliebig kombiniert
10 werden.

KURZBESCHREIBUNG DER FIGUREN

15 Figur 1 zeigt einen konventionellen Ansatz zur Bestimmung einer absoluten Laufzeit nach dem
Stand der Technik.

Figur 2 zeigt eine Signalsequenz umfassend drei aufeinanderfolgende, vorzugsweise quasi-
harmonische, Signale mit drei unterschiedlichen Frequenzen.

20 Figur 3 zeigt für jede Periode des Signals eine schematische Darstellung der Messung der
Laufzeit seit dem Startzeitpunkt für die Signalsequenz.

Figur 4 zeigt für eine Signalsequenz umfassend drei Signale mit drei unterschiedlichen
Signalfrequenzen die Laufzeitdifferenzen aufeinanderfolgende Perioden als Funktion des
25 Index der Laufzeitdifferenzen.

Figur 5 zeigt Messungen von Frequenzübergänge dreier Signale.

Figur 6 zeigt Messungen der absoluten Laufzeit eines Signals nach Figur 5 als Funktion der
30 fortlaufenden Zeit, hier nach einer Filterung um Rauschen zu reduzieren.

Figuren 7A bis 7C zeigen Blockdiagramme der Signaltechnik von möglichen
Implementierungen von erfindungsgemäßen Aspekten.

35 Bauteile, die in mehreren Figuren dargestellt sind, tragen dieselben Referenzzeichen.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG

Die Offenbarung betrifft ein Computer implementiertes Verfahren zur Bestimmung einer absoluten Laufzeit eines Signals, sowie entsprechend ein System zur Datenverarbeitung, ein Computerprogramm und ein (nicht-flüchtiges bzw. nicht-transitorisches) computerlesbares (Speicher-)Medium.

Figur 2 zeigt beispielhaft eine Signalsequenz umfassend drei aufeinanderfolgende, vorzugsweise quasi-harmonische, Signale mit drei unterschiedlichen Frequenzen. Es genügt jedoch für die Bestimmung einer absoluten Laufzeit, wenn die Signalsequenz zwei Signale mit zwei verschiedenen Frequenzen aufweist. Auch genügt es im Falle von drei oder mehr Signalen in der Signalsequenz, wenn zwei aufeinanderfolgende Signale zwei verschiedenen Frequenzen haben. Innerhalb der Signalsequenz können sich Frequenzen also wiederholen. Die zwei oder mehr Signale der Signalsequenz folgen aufeinander, wobei zwei aufeinanderfolgende Signale zeitlich unmittelbar aneinandergrenzen oder es kann zwischen den beiden Signalen ein zeitlicher Abstand bestehen. Wenn in dieser Offenbarung von aufeinanderfolgenden Signalen oder Perioden die Rede ist, können zeitlich unmittelbar oder mittelbar aufeinanderfolgende Signale bzw. Perioden gemeint sein und beide Möglichkeiten sind in jedem Fall möglich.

Das erfindungsgemäße Verfahren umfasst demnach: Empfangen einer Signalsequenz 100, die die Signalsequenz 100 umfassend: ein erstes Signal 10 mit einer ersten Signalfrequenz f_1 und einer ersten Anzahl N_1 an Perioden des ersten Signals mit der ersten Signalfrequenz, und ein auf das erste Signal 10 (unmittelbar oder mittelbar) folgende zweite Signal 20 mit einer zweiten Signalfrequenz f_2 , wobei die zweite Signalfrequenz von der ersten Signalfrequenz verschieden ist (entsprechend sind auch die Periodendauern T_1 , T_2 der beiden Signale verschieden); Bestimmen eines Zeitpunkts T_{12} eines Signalübergangs 101 von dem empfangenen ersten Signal 10 zu dem empfangenen zweiten Signal 20; und Bestimmen der absoluten Laufzeit, $absTOF_1$, des ersten Signals 10 seit einem Start-Zeitpunkt, t_{start} (z.B. bei Null Sekunden), für die Signalsequenz 100 unter Verwendung des bestimmten Zeitpunkts, t_{12} , für den Signalübergang 101 von dem empfangenen ersten Signal 10 zu dem empfangenen zweiten Signal 20 und der Anzahl, N_1 , an Perioden des ersten Signals 10 (die Anzahl der Perioden N_1 ist bevorzugt die Gesamtzahl der Perioden des ersten Signals 10 von Beginn des ersten Signals bis zum Ende des ersten Signals vor dem Zeitpunkt t_{12}).

Entsprechendes kann für das Signalpaar 20 und 30 gelten. Die Signalsequenz 100 in Fig. 2 umfasst ferner ein auf das zweite Signal 20 folgendes dritte Signal 30 mit einer dritten Signalfrequenz f_3 , wobei die dritte Signalfrequenz f_3 von der zweiten Signalfrequenz f_2 verschieden ist (f_3 kann aber gleich f_1 sein), und wobei das Verfahren ferner umfasst: Bestimmen eines Zeitpunkts t_{23} eines Signalübergangs 102 von dem empfangenen zweiten

Signal 20 zu dem empfangenen dritten Signal 30; und Bestimmen der absoluten Laufzeit des zweiten Signals 20 seit dem Start-Zeitpunkt t_{start} für die Signalsequenz 100 unter Verwendung des bestimmten Zeitpunkts t_{23} für den Signalübergang 102 von dem empfangenen zweiten Signal 20 zu dem empfangenen dritten Signal 30 und einer Anzahl, N_2 ,
5 an Perioden des zweiten Signals 20 (die Anzahl der Perioden N_2 ist bevorzugt die Gesamtzahl der Perioden des zweiten Signals 20 von Beginn des zweiten Signals bis zum Ende des zweiten Signals vor dem Zeitpunkt t_{23}).

Figur 3 zeigt für jede Periode i des Signals eine schematische Darstellung der Messung der Laufzeit seit dem Startzeitpunkt für die Signalsequenz.
10

Das Bestimmen des Zeitpunkts t_{12} des Signalübergangs 101 von dem empfangenen ersten Signal 10 zu dem empfangenen zweiten Signal 20 umfasst demnach bevorzugt: für jede Periode i zumindest eines Teils des empfangenen ersten Signals 10 und eines Teils des empfangenen zweiten Signals 20, Bestimmen einer Laufzeit TOF_i der Periode i seit dem Start-Zeitpunkt t_{start} für die Signalsequenz 100; Bestimmen von Differenzen der bestimmten Laufzeiten TOF_i (unmittelbar oder mittelbar) aufeinanderfolgender Perioden i des ersten Signals 10 und des zweiten Signals 20; Bestimmen des Zeitpunkts t_{12} des Signalübergangs 101 von dem empfangenen ersten Signal 10 zu dem empfangenen zweiten Signal 20 basierend auf einem
15 Bestimmen des Zeitpunkts t_{12} an dem die bestimmten Differenzen der bestimmten Laufzeiten TOF_i (unmittelbar oder mittelbar) aufeinanderfolgender Perioden zwischen der Periodendauer T_1 des ersten Signals 10 und der Periodendauer T_2 des zweiten Signals 20 wechseln.
20

Mit anderen Worten wird eine Signalsequenz 100 mit mindestens zwei Signalen 10, 20 verschiedener Frequenzen f_1 , f_2 und ein oder mehrerer bekannter Anzahlen N_1 , N_2 an Perioden erzeugt bzw. empfangen. In jeder Periode i , beispielsweise in jedem Nulldurchgang in vorgegebener Richtung (z.B. von + nach – oder umgekehrt), des jeweiligen empfangenen Signals 10, 20 wird ein Stoppsignal erzeugt. Aus dem Stoppsignal und dem Start-Zeitpunkt t_{start} der Signalsequenz 100 werden Laufzeiten TOF_i für jede Periode i des jeweiligen empfangenen Signals 10, 20 bestimmt. Die Differenz zwischen den TOF_i (unmittelbar oder mittelbar) aufeinanderfolgender bzw. benachbarter Perioden i der jeweiligen empfangenen Signale wird gebildet, wobei die Differenzen die Periodendauern T_1 bzw. T_2 der jeweiligen Signale 10 bzw. 20 ergeben sollen. Einen Wechsel in diesen Zeitdifferenzen (Periodendauern) resultiert aus einem Wechsel in der Signalfrequenz, sodass ein Wechsel in der Signalfrequenz und damit einen Übergang von dem ersten Signal 10 zu dem zweiten Signal 20 mittels eines Wechsels in den Zeitdifferenzen bzw. Periodendauern bestimmt werden kann. Anhand der für
25
30
35

das erste Signal 10 bekannten Anzahl N_1 von Perioden des ersten Signals kann man ermitteln, wann dieser Frequenzübergang, bzw. Übergang der Signale, erwartet wird. Die bestimmte Zeit t_{12} des Frequenzübergangs kann folglich mit der Anzahl N_1 der Perioden des ersten Signals korrigiert werden und zwar derart, dass von der bestimmten Zeit t_{12} des Frequenzübergangs
5 bzw. Signalübergangs 101 ein Korrekturterm abgezogen wird, der das Produkt der Anzahl N_1 der Perioden des ersten Signals 10 und der Periodendauer T_1 des ersten Signals 10 umfasst. Wenn das erste Signal 10 vor dem Frequenz- bzw. Signalübergang 101 empfangen wird, wird dieser Korrekturterm von der bestimmten Zeit t_{12} des Frequenz-bzw. Signalübergangs 101 abgezogen, um die absolute Laufzeit $absTOF$ des ersten Signals 10 zu erhalten.

10

Entsprechendes kann für das Signalpaar 20 und 30 gelten, um eine weitere absolute Laufzeit zu bestimmen. So kann beispielsweise die absolute Laufzeit des zweiten Signals 20 dadurch bestimmt werden, indem auf das zweite Signal das dritte Signal 30 (unmittelbar oder mittelbar) folgt, welches eine dritte Frequenz f_3 hat, die von der zweiten Frequenz f_2
15 verschieden ist. Auch hier kann der Frequenz-bzw. Signalübergang 102 zwischen dem zweiten Signal 20 und dem dritten Signal 30 dazu verwendet werden, um die absolute Laufzeit des zweiten Signals 20 zu bestimmen. Erfindungsgemäße Aspekte erlauben eine Skalierung auf beliebig viele Laufzeitmessungen $absTOF_i$ für beliebig viele Signale, wobei ein Frequenzübergang zwischen zwei (unmittelbar oder mittelbar) aufeinanderfolgende Signale
20 für die Bestimmung einer absoluten Laufzeit $absTOF_i$ verwendet werden kann.

Die Figuren 4-6 zeigen simulierte und experimentelle Daten, die mit einer Signalsequenz, hier beispielhaft umfassend drei verschiedene Signale mit drei verschiedenen Signalfrequenzen, erzeugt wurden. Fig. 4 zeigt simulierte Laufzeitdifferenzen (unmittelbar) aufeinanderfolgender Perioden. Fig. 5 zeigt experimentell bestimmte Frequenzen aus
25 Laufzeitdifferenzen (unmittelbar) aufeinanderfolgender Perioden. Fig. 6 zeigt den zeitlichen Verlauf der bestimmten absoluten Laufzeit.

Mit einer solchem Signalsequenz mit drei Frequenzanteilen wurden Ultraschall-Messungen an einem dynamisch ankoppelnden System, nämlich an einem Proband, sowie entsprechende Simulationen durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit von erfindungsgemäßen Aspekten zu
30 demonstrieren.

Figur 4 zeigt simulierte Daten für eine Signalsequenz umfassend drei Signale mit den drei unterschiedlichen Signalfrequenzen f_1 , f_2 , f_3 die Differenzen der TOF_i (unmittelbar) aufeinanderfolgender Perioden i der drei Signale als Funktion des Index der
35 Laufzeitdifferenzen der Perioden. Die Frequenzen in der Signalsequenz von Figur 4 entsprechen $f_1=1$ MHz, $f_2=1.2$ MHz und $f_3=1.4$ MHz mit einer Periodenanzahl $N_1=N_2=N_3$ von

jeweils 30 Perioden. Die sich aus den drei unterschiedlichen Frequenzen ergebenen drei unterschiedlichen Periodendauern T_1 , T_2 , T_3 sind den Messpunkten und der Y-Achse entnehmbar.

- 5 Figur 5 zeigt experimentelle Daten für eine Signalsequenz umfassend drei Signale mit den drei unterschiedlichen Signalfrequenzen f_1 , f_2 , f_3 aus Fig. 4, die zwei Frequenzübergänge 12 und 23 zwischen ersten und zweiten Signal bzw. zwischen zweiten und dritten Signal. Die Frequenzen in dieser Signalsequenz entsprechen $f_1=1.0\text{MHz}$, $f_2=1.2\text{MHz}$ und $f_3=1.4\text{MHz}$ mit einer Periodenanzahl von jeweils 30 Perioden.

10

- Aus den zwei Frequenzübergängen 12, 23 (hier beispielhaft Index 26 bzw. 56) in Fig. 5 bzw. der Zeitpunkte t_{12} bzw. t_{23} der Frequenzübergänge 12, 23, lassen sich zwei absolute Laufzeiten bestimmen, nämlich die des ersten Signals 10 und des zweiten Signals 20. Diese liegen im Beispiel bei der betrachteten Einzelmessung bei $t_{12} = 131.1762\text{ }\mu\text{s}$ und $t_{23} = 156.3001\text{ }\mu\text{s}$. Hier sei erwähnt, dass für jeden Signal- bzw. Frequenzübergang zwischen zwei Signalen der entsprechende Index bzw. Zeitpunkt der letzten bzw. spätesten Periode des früheren Signals, der entsprechende Index bzw. Zeitpunkt der Rampe bzw. des Übergangs (siehe „12“ und „23“ in Fig. 5) zwischen den beiden Signalen, oder der entsprechende Index bzw. Zeitpunkt der ersten bzw. frühesten Periode des späteren Signals der beiden Signale als
- 15 T_{12} bzw. t_{23} für die nun folgende Berechnung der absoluten Laufzeit $absTOF$ verwendet werden kann. Ein andere Auswahl für t_{12} bzw. t_{23} ist möglich.

- Die absoluten Laufzeiten werden anhand der Zeitpunkte für die bestimmten Frequenzübergänge (t_{12} , t_{23}), mit optionalen Korrekturtermen, k_1 , k_2 , und der Anzahl der gesendeten Perioden berechnet, und liegen in der betrachteten beispielhaften Messung bei
- 25

$$\begin{aligned} \circ \quad absTOF1 &= t_{12} - \frac{30}{f_1} + k_1 = 101.2593\text{ }\mu\text{s} \\ \circ \quad k_1 &= \frac{0.5}{f_1} - \frac{0.5}{f_2} = \frac{0.5}{1\text{MHz}} - \frac{0.5}{1.2\text{MHz}} = 0.083\text{ }\mu\text{s} \end{aligned}$$

30

$$\begin{aligned} \circ \quad absTOF2 &= t_{23} - \frac{30}{f_1} - \frac{30}{f_2} + k_2 = 101.4431\text{ }\mu\text{s} \\ \circ \quad k_2 &= \frac{0.5}{f_1} - \frac{0.5}{f_3} = \frac{0.5}{1\text{MHz}} - \frac{0.5}{1.4\text{MHz}} = 0.143\text{ }\mu\text{s} \end{aligned}$$

- Für die Berechnung der absoluten Laufzeit $absTOF1$ des ersten Signals 10 wird zunächst der Zeitpunkt t_{12} bestimmt für den Übergang vom ersten Signal 10 zum zweiten Signal 20. Davon wird abgezogen das Produkt aus der Anzahl $N_1 = 30$ der Perioden des ersten Signals und der Periodendauer $T_1 = 1/f_1$ des ersten Signals. Es können ggf. weitere Korrekturterme, k_1 ,
- 35

hinzugefügt werden (k_1 kann auch Null sein), die durch die Gestaltung des Übergangs der Signale (z.B. zeitlicher Abstand zwischen den Signalen 10, 20) gegeben sein können.

Für die Berechnung der absoluten Laufzeit absTOF_2 des zweiten Signals 20 wird zunächst der Zeitpunkt t_{23} bestimmt für den Übergang vom zweiten Signal 20 zum dritten Signal 30. Davon wird abgezogen das Produkt aus der Anzahl $N_1 = 30$ der Perioden des ersten Signals und der Periodendauer $T_1 = 1/f_1$ des ersten Signals, sowie das Produkt aus der Anzahl $N_2 = 30$ der Perioden des zweiten Signals und der Periodendauer $T_2 = 1/f_2$ des zweiten Signals. Es können weitere Korrekturterme, zusammengefasst als k_2 , hinzugefügt werden, die durch die Gestaltung des Übergangs der Signale (z.B. zeitlicher Abstand zwischen den Signalen) gegeben sein können. In diesem Beispiel ist $k_2 = 0.5/f_1 - 0.5/f_3$. In jeder der obigen Gleichungen für absTOF_i können Korrekturterme (k_1 , k_2) berücksichtigt werden, die Umstände berücksichtigen können wie ein verzögertes Startsignal (t_{start}), was von der 1. Frequenz abhängig ist, und/oder eine halbe Periode eines oder beider Signale beim Frequenzwechsel, bei dem die absolute Laufzeit bestimmt werden soll. Es ist eine System- bzw. Signal-Profilabhängige Konstante. Die Korrekturterme können auch über eine Kalibrierung bestimmt werden.

Bei Figur 5 handelt es sich um Messung am menschlichen Kopf wodurch Inhomogenitäten und Grenzsichten im Schallweg auftreten können.

Figur 6 zeigt einen Ausschnitt von Messungen der absoluten Laufzeit absTOF eines der drei Signale nach Figur 5 als Funktion der fortlaufenden Zeit seit Beginn der Messung (hier nach einer Filterung um Rauschen zu reduzieren). Dazu wird die Signalsequenz mehrfach bzw. fortlaufend ausgesendet und empfangen. Da diese Messungen auf Ultraschallsignalen basieren, die durch einen Kopf eines Probanden propagierten, ergibt sich die in Figur 6 ersichtliche Periodizität von ca. 1 Sekunde aus der Herzfrequenz des Probanden. Der in Figur 6 ersichtliche Trend der Kurve ist jedoch auf Veränderungen des Mediums bzw. dessen Schallgeschwindigkeit oder Schallweg zurückzuführen, was verdeutlicht, mit welcher Genauigkeit die absolute Laufzeit und Veränderungen der absoluten Laufzeit durch erfindungsgemäße Aspekte bestimmt werden können.

Figuren 7A bis 7C zeigen Blockdiagramme der Signaltechnik von möglichen Implementierungen von erfindungsgemäßen Aspekten.

Wie in Figur 7A und 7B dargestellt, steuert ein System 1 zur Datenverarbeitung, umfassend Computer/Controller und (Speicher-)Medium, einen Signalgenerator 2. Bevor das Signal

durch einen Sender 4 (ggf. konvertiert und) übertragen wird, kann das Signal optional durch einen Verstärker 3 verstärkt werden, beispielsweise um die weitere Signalverarbeitungstechnik (z.B. 8) besser in einem dynamischen Bereich zu halten. Sofern die Signalstärke aber über eine hinreichende Intensität und/oder Stabilität verfügt, ist solch ein
5 Verstärker 3 nicht nötig.

Das Signal, beispielsweise Ultraschallsignal, wird dann mit einem Sender 4, beispielsweise eine Ultraschallsonde, durch ein Medium, beispielsweise ein Kopf eines Menschen, übertragen und nach Durchlauf durch das Medium von einem Empfänger 5, beispielsweise eine Ultraschallsonde, empfangen. Auf Seiten des Senders 4 kann die Ultraschallsonde ein durch
10 den Signalgenerator 2 erzeugtes und gegebenenfalls verstärktes elektrisches Signal in eine mechanische Longitudinalwelle umwandeln. Der Empfänger 5, beispielsweise Ultraschallsonde fängt das übertragene Signal, wobei im Falle eines Ultraschallsignal als das empfangene Ultraschallsignal von der Ultraschallsonde in ein elektrisches Signal umgewandelt wird.

15 Nach dem Empfänger 5 wird das empfangene und ggf. umgewandelte Signaldurch einen Vorverstärker 6 optional verstärkt (z.B. in Sättigung). Alternativ oder zusätzlich kann ein Komparator 7, wie ein Schmitt Trigger, das empfangene Signal in ein binäres Signal wandeln. Jede dieser beiden Maßnahmen kann einzeln und in Kombination Flanken der Signale steiler ausgestalten und bewirken, dass die weiteren Laufzeitmessungen gänzlich unabhängig von
20 Amplituden durchführbar sind.

Ein oder mehrere Sensoren 8 werden von dem System 1 angesteuert und ausgelesen, um Laufzeiten TOF_i einzelner Perioden i der empfangenen Signale zu bestimmen und mittels einer Software den Übergang t_{12}, t_{23} zwischen zwei der Signale verschiedener Frequenzen f_1, f_2, f_3 zu bestimmen. Das System 1 ermittelt mittels einer Software aus der bestimmten Zeit $t_{12},$
25 t_{23} des Signalübergangs (und damit Frequenzübergangs 12, 23) eine absolute Laufzeit absTOF_i eines der empfangenen Signale 10, 20, 23.

Ist der Sensor 8 ausgelegt, sämtliche Laufzeiten TOF_i der gesamten Anzahl von Perioden vom erstem Signal bis zweitem Signal zu messen, so genügt ein einzelner Sensor. Sensor 8 kann aber auch mehrere einzelne Sensoren umfassen, die zusammengeschaltet sind und vom
30 Computer/Controller gesteuert und ausgelesen werden. Figure 7C zeigt ein Beispiel, bei dem Sensor 8 sechzehn einzelne Sensoren TDC1 bis TDC16 (TDC: Time-to-Digital Chip, digitale Stoppuhr) umfasst. Beispielsweise kann jeder der Sensoren TDC $_i$ ausgelegt sein, fünf TOF_i für fünf Perioden i zu messen, sodass die Laufzeitenmessungen für insgesamt achtzig Perioden durchgeführt werden können.

Das System 1 führt eine Software aus, die sicherstellt, dass die TDC1-16 nicht dieselben Nulldurchgänge messen, sondern kaskadiert Messungen vornehmen (immer die nächste Periode messen). Die letzte Messzeit des TDC1 bestimmt die erste Messzeit des TDC2. Die letzte Messzeit des TDC2 bestimmt die erste Messzeit des TDC3 usw.

- 5 Der Start-Zeitpunkt kann den Startpunkt der Messungen durch die ein oder mehreren Sensoren 8 definieren. Dieser kann dann gegeben sein, wenn durch das System 1 und den optionalen Verstärker 3 ermittelt wird, dass die darauffolgenden Signaltechnik, insb. die Sensoren 8, in einem dynamischen Bereich arbeiten.

- 10 Durch die hier beschriebenen erfindungsgemäßen Aspekte kann die absolute Laufzeit von Signalen verlässlicher, unabhängig von einem Einschwingverhalten, und genauer bestimmt werden. Dies führt zu einer neuen Qualität von Signalverarbeitung in verschiedensten Anwendungen, wie der Medizintechnik oder der Verkehrstechnik.

- Die hier beschriebene Software, Computerprogramme, Verfahren, Systeme zur Datenverarbeitung, Computer, (Speicher)-Medien und Controller können durch beliebige
15 Software- bzw. Computertechnik implementiert werden.

- In der Beschreibung und in den Figuren sind bevorzugte Ausführungsformen der durch die beigefügten Ansprüche beanspruchten Gegenstände beschrieben. Die in der vorstehenden Beschreibung, den Ansprüchen und den Zeichnungen offenbarten optionalen Merkmale können sowohl einzeln als auch in beliebiger Kombination für die Ausführung der hier gemäß
20 der beiliegenden Ansprüche beanspruchten Gegenstände in ihren verschiedenen Ausgestaltungen Verwendung finden.

- Die verschiedenen oben beschriebenen Aspekte und Ausführungsformen können kombiniert werden, um noch weitere Ausführungsformen zu schaffen. Diese und andere Änderungen können an den Ausführungsformen im Lichte der obigen detaillierten Beschreibung
25 vorgenommen werden. Im Allgemeinen sollten die in den folgenden Ansprüchen verwendeten Begriffe nicht so ausgelegt werden, dass sie die Ansprüche auf die in der Beschreibung und den Ansprüchen offengelegten spezifischen Aspekte und Ausführungsformen beschränken, sondern so, dass sie alle möglichen Ausführungsformen zusammen mit dem vollen Umfang der Äquivalente, auf die diese Ansprüche Anspruch haben, umfassen.

30

Ansprüche

1. Ein Computer implementiertes Verfahren zur Bestimmung einer absoluten Laufzeit eines Signals, umfassend
 - 5 Empfangen einer Signalsequenz (100), die Signalsequenz (100) umfassend:
 - ein erstes Signal (10) mit einer ersten Signalfrequenz und einer ersten Anzahl an Perioden des ersten Signals (10) mit der ersten Signalfrequenz, und
 - ein auf das erste Signal folgendes zweites Signal (20) mit einer zweiten Signalfrequenz, wobei die zweite Signalfrequenz von der ersten Signalfrequenz
 - 10 verschieden ist;
 - Bestimmen eines Zeitpunkts eines Signalübergangs (101) von dem empfangenen ersten Signal (10) zu dem empfangenen zweiten Signal (20); und
 - Bestimmen der absoluten Laufzeit des ersten Signals (10) seit einem der Signalsequenz (100) zugeordneten Start-Zeitpunkt unter Verwendung des
 - 15 bestimmten Zeitpunkts für den Signalübergang (101) von dem empfangenen ersten Signal (10) zu dem empfangenen zweiten Signal (20) und der Anzahl an Perioden des ersten Signals (10).
2. Das Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Bestimmen des Zeitpunkts des Signalübergangs (101) von dem empfangenen ersten Signal zu dem empfangenen zweiten Signal umfasst:
 - 20 für jede Periode zumindest eines Teils des empfangenen ersten Signals (10) und eines Teils des empfangenen zweiten Signals (20), Bestimmen einer Laufzeit der Periode seit dem Start-Zeitpunkt für die Signalsequenz (100);
 - 25 Bestimmen von Differenzen der bestimmten Laufzeiten aufeinanderfolgender Perioden des ersten Signals (10) und des zweiten Signals (20);
 - Bestimmen des Zeitpunkts des Signalübergangs (101) von dem empfangenen ersten Signal (10) zu dem empfangenen zweiten Signal (20) basierend auf einem Bestimmen des Zeitpunkts an dem die bestimmten Differenzen der bestimmten Laufzeiten
 - 30 aufeinanderfolgender Perioden zwischen der Periodendauer des ersten Signals (10) und der Periodendauer des zweiten Signals (20) wechseln.
3. Das Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei die absolute Laufzeit des ersten Signals (10) seit dem Start-Zeitpunkt der Signalsequenz (100) bestimmt wird durch den
- 35 bestimmten Zeitpunkt für den Signalübergang (101) von dem ersten Signal (10) zu

dem zweiten Signal (20), korrigiert durch einen ersten zeitlichen Korrekturterm, der auf der Anzahl der Perioden des ersten Signals (10) basiert.

- 5 4. Das Verfahren nach Anspruch 3, wobei der erste Korrekturterm das Produkt aus der Anzahl der Perioden des ersten Signals (10) und der Periodendauer des ersten Signals (10) umfasst.
- 10 5. Das Verfahren nach irgendeinem der vorangehenden Ansprüche, ferner umfassend Verstärken der empfangenen Signalsequenz (100) vor dem Bestimmen des Zeitpunkts des Signalübergangs (101) von dem empfangenen ersten Signal (10) zu dem empfangenen zweiten Signal (20).
- 15 6. Das Verfahren nach Anspruch 5, ferner umfassend Umwandeln der vorzugsweise verstärkten Signalsequenz (100) in ein binäres Signal, vorzugsweise wobei das Umwandeln mittels eines Komparators (7), vorzugsweise einem Schmitt-Trigger, erfolgt.
- 20 7. Das Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, wobei das Bestimmen der Laufzeit jeder Periode seit dem Start-Zeitpunkt anhand einer Flanke des betreffenden binären Signals in einer vorgegebenen Richtung erfolgt.
- 25 8. Das Verfahren nach irgendeinem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Signalsequenz (100) ferner ein auf das zweite Signal (20) folgendes drittes Signal (30) mit einer dritten Signalfrequenz umfasst, wobei die dritte Signalfrequenz von der zweiten Signalfrequenz verschieden ist, und wobei das Verfahren ferner umfasst:
Bestimmen eines Zeitpunkts eines Signalübergangs (102) von dem empfangenen zweiten Signal (20) zu dem empfangenen dritten Signal (30); und
Bestimmen der absoluten Laufzeit des zweiten Signals (20) seit dem Start-Zeitpunkt für die Signalsequenz (100) unter Verwendung des bestimmten Zeitpunkts für den
30 Signalübergang (102) von dem empfangenen zweiten Signal (20) zu dem empfangenen dritten Signal (30) und einer Anzahl an Perioden des zweiten Signals (20).
- 35 9. Das Verfahren nach Anspruch 8, wobei das Bestimmen des Zeitpunkts des Signalübergangs (102) von dem empfangenen zweiten Signal (20) zu dem empfangenen dritten Signal (30) umfasst:

- für jede Periode zumindest eines Teils des empfangenen zweiten Signals (20) und eines Teils des empfangenen dritten Signals, Bestimmen einer Laufzeit der Periode seit dem Start-Zeitpunkt für die Signalsequenz (100);
Bestimmen von Differenzen der bestimmten Laufzeiten aufeinanderfolgender Perioden des zweiten Signals (20) und des dritten Signals;
Bestimmen des Zeitpunkts des Signalübergangs (102) von dem empfangenen zweiten Signal (20) zu dem empfangenen dritten Signal basierend auf einem Bestimmen des Zeitpunkts an dem die bestimmten Differenzen der bestimmten Laufzeiten aufeinanderfolgender Perioden zwischen der Periodendauer des zweiten Signals (20) und der Periodendauer des dritten Signals wechseln.
10. Das Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, wobei die absolute Laufzeit des zweiten Signals (20) seit dem Start-Zeitpunkt der Signalsequenz (100) bestimmt wird durch den bestimmten Zeitpunkt für den Signalübergang (102) von dem zweiten Signal (20) zu dem dritten Signal, korrigiert durch einen zweiten zeitlichen Korrekturterm, der auf der Anzahl der Perioden des zweiten Signals (20) basiert.
11. Das Verfahren nach Anspruch 10, wobei der zweite Korrekturterm das Produkt aus der Anzahl der Perioden des zweiten Signals (20) und der Periodendauer des zweiten Signals (20) umfasst.
12. Das Verfahren nach irgendeinem der vorangehenden Ansprüche 3-11, wobei der erste und/oder zweite Korrekturterm ferner ein oder mehrere weitere zeitliche Korrekturen umfasst, die durch den Start-Zeitpunkt und/oder den Übergang (101, 102) der betreffenden Signale (10, 20, 30) gegeben sind.
13. Das Verfahren nach irgendeinem der vorangehenden Ansprüche 2-12, wobei das Bestimmen der Laufzeit jeder Periode seit dem Start-Zeitpunkt zum Zeitpunkt eines Nulldurchgangs des betreffenden Signals in einer vorgegebenen Richtung des Signalwechsels erfolgt.
14. System (1) zur Datenverarbeitung, umfassend Mittel zur Ausführung des Verfahrens nach irgendeinem der vorangehenden Ansprüche.
15. Computerprogramm, umfassend Befehle, die bei der Ausführung des Programms durch einen Computer diesen veranlassen, das Verfahren nach irgendeinem der vorangehenden Ansprüche 1-13 auszuführen.

16. Computerlesbares Medium, umfassend Befehle, die bei der Ausführung durch einen Computer diesen veranlassen, das Verfahren nach irgendeinem der vorangehenden Ansprüche 1-13 auszuführen.