



(10) **DE 10 2021 207 339 B3** 2022.10.27

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2021 207 339.5**
(22) Anmeldetag: **12.07.2021**
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **27.10.2022**

(51) Int Cl.: **G01R 23/165** (2006.01)
G10L 25/18 (2013.01)
G10L 25/90 (2013.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Körperschaft des öffentlichen Rechts, 26129
Oldenburg, DE

(74) Vertreter:
Fink Numrich Patentanwälte PartmbB, 80634
München, DE

(72) Erfinder:
Hohmann, Volker, 26131 Oldenburg, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US 5 812 737 A

BITTNER, Rachel M.; WANG, Avery; BELLO, Juan P.: Pitch contour tracking in music using Harmonic Locked Loops. In: Proc. of the 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 5.-9. März 2017, S. 191-195

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur Analyse eines Zeitsignals mit periodischen Signalanteilen sowie Computerprogrammprodukt und Computerprogramm**

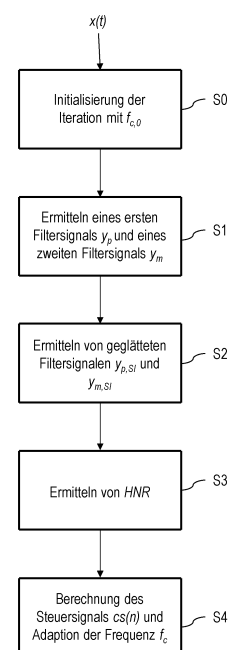
(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Analyse eines Zeitsignals ($x(t)$) mit periodischen Signalanteilen, bei dem für aufeinander folgende Zeitpunkte jeweils mittels einer oder mehrerer Iterationen jeweils Frequenzen und den Frequenzen zugeordnete Signalparameter (HNR) aus dem Zeitsignal ($x(t)$) extrahiert werden, wobei für eine aktuelle Frequenz (f_c) in einer aktuellen Iterationsschleife einer jeweiligen Iteration für einen aktuellen Zeitpunkt folgende Schritte durchgeführt werden

a) Ermitteln eines ersten Filtersignals (y_p) und eines zweiten Filtersignals (y_m) basierend auf dem Zeitsignal ($x(t)$) über eine Summen- und Differenzbildung im Zeitsignal ($x(t)$) zu Zeitpunkten, die um eine Periode gemäß der aktuellen Frequenz (f_c) versetzt sind;

b) Ermitteln des Signalparameters (HNR) für die aktuelle Frequenz (f_c) als eine Größe, die das Verhältnis eines Signalstärkemaßes des ersten Filtersignals (y_p) zu einem Signalstärkemaß des zweiten Filtersignals (y_m) anzeigt;

c) Ermitteln eines Steuersignals ($cs(n)$), das anzeigt, ob eine Phasendifferenz zwischen dem ersten Filtersignal (y_p) und dem zweiten Filtersignals (y_m) positiv oder negativ ist,

d) Modifikation der aktuellen Frequenz (f_c), indem sie vergrößert wird, wenn das Steuersignal ($cs(n)$) eine negative Phasendifferenz anzeigt, und indem sie verkleinert wird, wenn das Steuersignal ($cs(n)$) eine positive Phasendifferenz anzeigt, wobei die modifizierte Frequenz als die aktuelle Frequenz (f_c) in der nächsten Iterationsschleife verwendet wird.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Analyse eines Zeitsignals mit periodischen Signalanteilen sowie ein Computerprogrammprodukt und ein Computerprogramm.

[0002] Zeitsignale mit periodischen Signalanteilen kommen sowohl in der Natur als auch in einer Vielzahl von technischen Anwendungen vor. Im Rahmen einer Verarbeitung solcher Signale stellt die Periodizität eine wichtige Information dar, so dass das Bedürfnis besteht, entsprechende Grundfrequenzen aus diesen Signalen zu extrahieren. Beispiele für natürliche Signale mit periodischen Signalanteilen sind akustische Signale, wie Sprachsignale, Musik und dergleichen. Technische Beispiele für solche Signale sind Zeitsignale in mechanischen oder elektrodynamischen Systemen, wie z.B. Hochfrequenzwellen.

[0003] Aus dem Stand der Technik sind sog. PLL-Verfahren (PLL = Phase-Locked Loop) bekannt, um die Periodizität in Zeitsignalen zu detektieren und zu schätzen. PLL-basierte Verfahren sind jedoch nicht für beliebige Signalformen verwendbar. Vor allem eignen sie sich für sinusförmige Signale.

[0004] Aus dem Stand der Technik sind ferner DLL-Verfahren (DLL = Delay-Locked Loop) bekannt, welche interne Verzögerungen zur Detektion und Schätzung von periodischen Signalen nutzen. Auch diese Verfahren eignen sich nicht zur Detektion von periodischen Signalen mit beliebiger Wellenform.

[0005] Die Druckschrift US 5 812 737 A offenbart ein Verfahren zur Schätzung der Frequenz in einem periodischen Signal basierend auf einer Regelschleife, bei der ein Frequenzfehlersignal zu Verbesserung der Frequenzschätzung genutzt wird.

[0006] Die Druckschrift BITTNER, Rachel M.; WANG, Avery; BELLO, Juan P.: Pitch contour tracking in music using Harmonic Locked Loops. In: Proc. of the 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 5.-9. März 2017, S. 191-195 offenbart ein Verfahren zur Tonhöhenverfolgung in einem Musiksignal unter Verwendung einer HLL-Regelschleife (HLL = Harmonic Locked Loop).

[0007] Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zur Analyse eines Zeitsignals zu schaffen, mit dem einfach und zuverlässig die Grundfrequenzen von periodischen Signalanteilen in einem Zeitsignal geschätzt werden können.

[0008] Diese Aufgabe wird durch das Verfahren gemäß Patentanspruch 1 gelöst. Weiterbildungen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen definiert.

[0009] Das erfindungsgemäße Verfahren analysiert ein Zeitsignal mit periodischen Signalanteilen. Das Zeitsignal stellt somit das im erfindungsgemäßen Verfahren verarbeitete Signal dar. Vorzugsweise ist das Verfahren digital als rechnergestütztes bzw. computer-implementiertes Verfahren umgesetzt. In diesem Fall ist das Zeitsignal ein digitales bzw. ein aus einem analogen Signal digitalisiertes Signal, das zu entsprechenden Abtastzeitpunkten einen Signalwert liefert. Nichtsdestotrotz kann das Verfahren gegebenenfalls auch zumindest zum Teil als analoges Verfahren implementiert werden. Insbesondere sind analoge Filter bekannt, mit denen die weiter unten beschriebene Ermittlung der ersten und zweiten Filtersignale durchgeführt werden kann.

[0010] Im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens werden für aufeinander folgende Zeitpunkte im Zeitsignal jeweils mittels einer oder mehrerer Iterationen jeweils Frequenzen und den Frequenzen zugeordnete Signalparameter ausgehend von einer initialen Frequenz aus dem Zeitsignal extrahiert. Für eine aktuelle Frequenz in einer aktuellen Iterationsschleife einer jeweiligen Iteration werden im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens für einen aktuellen Zeitpunkt der aufeinander folgenden Zeitpunkte die nachfolgend erläuterten Schritte a) bis d) durchgeführt. Die Reihenfolge der Schritte kann beliebig festgelegt sein, sofern ein Schritt nicht das Ergebnis eines anderen Schritts verwendet.

[0011] In Schritt a) wird ein erstes Filtersignal und ein zweites Filtersignal basierend auf einem Eingangssignal ermittelt. Das Eingangssignal kann dabei das ursprüngliche Zeitsignal oder ein geglättetes Zeitsignal sein. Im Falle eines geglätteten Zeitsignals beinhaltet das Verfahren somit auch einen entsprechenden Glättungsschritt. Wie sich aus der nachfolgenden Beschreibung ergibt, können im erfindungsgemäßen Verfahren auch noch andere geglättete Größen bzw. Signale verarbeitet werden. Sofern im Folgenden auf entsprechende geglättete Signale bzw. Größen verwiesen wird, ist dies immer dahingehend zu verstehen, dass im erfindungsgemäßen Verfahren ein entsprechender Glättungsschritt für diese Signale bzw. Größen durchge-

führt wird. Die Glättung kann dabei auf unterschiedliche Weise implementiert werden. Vorzugsweise wird ein Tiefpass-IIR-Filter oder ein Tiefpass-FIR-Filter genutzt, wie weiter unten näher beschrieben wird. Nichtsdestotrotz können auch andere Glättungsverfahren (z.B. arithmetische Mittelwertbildung) verwendet werden.

[0012] Das in Schritt a) ermittelte erste Filtersignal stellt die Summe aus dem Eingangssignal zum aktuellen Zeitpunkt und dem Eingangssignal zu dem (früheren) Zeitpunkt dar, der eine Periode gemäß der aktuellen Frequenz vor dem aktuellen Zeitpunkt liegt. Demgegenüber stellt das zweite Filtersignal die Differenz zwischen dem Eingangssignal zum aktuellen Zeitpunkt und dem Eingangssignal zu dem (früheren) Zeitpunkt dar, der eine Periode gemäß der aktuellen Frequenz vor dem aktuellen Zeitpunkt liegt.

[0013] In Schritt b) des erfindungsgemäßen Verfahrens wird der Signalparameter für die aktuelle Frequenz als eine Größe ermittelt, die das Verhältnis oder das geglättete Verhältnis eines Signalstärkemaßes oder eines geglätteten Signalstärkemaßes des ersten Filtersignals oder eines geglätteten ersten Filtersignals zu einem Signalstärkemaß oder einem geglätteten Signalstärkemaß des zweiten Filtersignals oder eines geglätteten zweiten Filtersignals anzeigt. Das Signalstärkemaß kann je nach Ausgestaltung unterschiedlich definiert werden. Beispielsweise kann das Signalstärkemaß den Betrag oder das Quadrat des entsprechenden ersten bzw. zweiten (gegebenenfalls geglätteten) Filtersignals darstellen. Der Signalparameter basierend auf dem oben definierten Verhältnis der Signalstärkemaße zeigt an, wie stark der Anteil einer periodischen Komponente in dem Zeitsignal bei der aktuellen Frequenz ist.

[0014] In Schritt c) des erfindungsgemäßen Verfahrens wird ein Steuersignal ermittelt, das anzeigt, ob eine Phasendifferenz positiv oder negativ ist, wobei die Phasendifferenz die Phasendifferenz zwischen dem ersten Filtersignal oder dem geglätteten ersten Filtersignal und dem zweiten Filtersignal oder dem geglätteten zweiten Filtersignal ist. Alternativ kann diese Phasendifferenz auch eine geglättete Phasendifferenz, d.h. die entsprechende Phasendifferenz nach der Durchführung einer Glättung, sein.

[0015] Schließlich wird im Schritt d) des erfindungsgemäßen Verfahrens die aktuelle Frequenz modifiziert, indem sie vergrößert wird, wenn das Steuersignal eine negative Phasendifferenz anzeigt, und indem sie verkleinert wird, wenn das Steuersignal eine positive Phasendifferenz anzeigt, wobei die modifizierte Frequenz als die aktuelle Frequenz in der nächsten Iterationsschleife der jeweiligen Iteration verwendet wird.

[0016] Die mit dem erfindungsgemäßen Verfahren gewonnenen Frequenzen und Signalparameter können in geeigneter Weise (vorzugsweise digital) gespeichert werden und gegebenenfalls über eine Benutzerschnittstelle als Information ausgegeben werden

[0017] Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht auf einfache Weise mit einem neuartigen Steuersignal eine Regelschleife, die sich schnell und zuverlässig auf eine Grundfrequenz im verarbeiteten Zeitsignal einregelt. Insbesondere liefert das erfindungsgemäße Verfahren auch gute Ergebnisse bei stark verrauschten Signalen, wie der Erfinder basierend auf simulierten Signalen nachweisen konnte.

[0018] In einer besonders bevorzugten Ausführungsform wird im Falle, dass der Signalparameter in der aktuellen Iterationsschleife oder über mehrere Iterationsschleifen umfassend die aktuelle Iterationsschleife und eine vorbestimmte Anzahl von früheren Iterationsschleifen hinweg oder der über die mehreren Iterationsschleifen gemittelte Signalparameter einen vorbestimmten Schwellwert überschreitet, die aktuelle Frequenz als eine Grundfrequenz im Zeitsignal identifiziert wird. Diese Grundfrequenz kann in geeigneter Weise (vorzugsweise digital) gespeichert werden und gegebenenfalls über eine Benutzerschnittstelle als Information ausgegeben werden. Die geeignete Festlegung der Höhe des Schwellwerts liegt im Rahmen von fachmännischem Handeln. Beispielsweise hat sich ein Schwellwert von 6 dB als praktikabel erwiesen.

[0019] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform werden das geglättete Zeitsignal und/oder das geglättete erste Filtersignal und/oder das geglättete zweite Filtersignal und/oder das geglättete Verhältnis und/oder das geglättete Signalstärkemaß des ersten Filtersignals oder des geglätteten ersten Filtersignals und/oder das geglättete Signalstärkemaß des zweiten Filtersignals oder des geglätteten zweiten Filtersignals und/oder die geglättete Phasendifferenz mittels einer Glättung basierend auf einem Tiefpass-IIR-Filter (IIR = Infinite Impulse Response) ermittelt, vorzugsweise mit einem Tiefpass-IIR-Filter erster Ordnung.

[0020] Solche Tiefpass-IIR-Filter sind dem Fachmann hinlänglich bekannt. Diese Filter arbeiten rekursiv, wobei das geglättete Signal zum aktuellen Zeitpunkt (d.h. zum aktuellen Abtastzeitpunkt) aus dem eingehenden Signal (d.h. dem zu glättenden Signal) zum aktuellen Zeitpunkt und gegebenenfalls eingehenden Signalen zu einem oder mehreren früheren Zeitpunkten unter Verwendung von einem oder mehreren geglätteten

Signalen bestimmt wird, die in früheren Rekursionsschleifen ermittelt wurden. In an sich bekannter Weise ist ein Tiefpass-IIR-Filter erster Ordnung basierend auf folgender Vorschrift definiert:

$$s_g(n) = (1 - \alpha) \cdot s(n) + \alpha s_g(n-1)$$

wobei $s(n)$ das eingehende Signal zum aktuellen Zeitpunkt ist;

wobei $s_g(n)$ das geglättete Signal zum aktuellen Zeitpunkt ist;

wobei $s_g(n-1)$ das zum vorhergehenden Zeitpunkt bestimmte geglättete Signal ist; wobei $\alpha = e^{-T/\tau}$ ist und T die Abtastperiode der Zeitpunkte ist und τ die Zeitkonstante des Filters ist.

[0021] Über die Zeitkonstante τ wird die Stärke der Glättung bzw. Filterung definiert. Die geeignete Wahl dieser Zeitkonstante liegt im Rahmen von fachmännischem Handeln. Insbesondere kann die Zeitkonstante im erfindungsgemäßen Verfahren für die Glättung unterschiedlicher Signalarten bzw. Größen auch verschieden festgelegt werden. Die Zeitkonstante liegt vorzugsweise in der Größenordnung der Periode der aktuellen Frequenz.

[0022] Analog sind entsprechende Rechenvorschriften für Tiefpass-IIR-Filter höherer Ordnung bekannt. Diese Filter sind ebenfalls durch eine Zeitkonstante charakterisiert. Sie berücksichtigen bei der Glättung jedoch nicht nur das eingehende Signal zum aktuellen Zeitpunkt, sondern auch frühere eingehende Signale. Vorzugsweise werden dabei frühere eingehende Signale mit einem festen zeitlichen Abstand zu jeweiligen Referenzzeitpunkten berücksichtigt, welche in der detaillierten Beschreibung anhand von **Fig. 2** erläutert werden.

[0023] Die im erfindungsgemäßen Verfahren durchgeführte Modifikation der aktuellen Frequenz in Schritt d) kann unterschiedlich ausgestaltet sein. In einer bevorzugten Variante erfolgt die Modifikation mittels eines Faktors größer Eins, wobei zur Vergrößerung der aktuellen Frequenz diese mit dem Faktor multipliziert wird und wobei zur Verkleinerung der aktuellen Frequenz diese durch den Faktor geteilt wird. Vorzugsweise hängt der Faktor dabei von der aktuellen Frequenz ab und wird umso größer, je größer die aktuelle Frequenz ist.

[0024] Erfindungsgemäß kann das Steuersignal, das das Vorzeichen der Phasendifferenz bzw. der geglätteten Phasendifferenz anzeigt, auf unterschiedliche Weise definiert werden. In einer besonders bevorzugten Variante wird das Steuersignal wie folgt ermittelt:

$$c(n) = y_1(n) + iy_2(n)$$

$$adc(n) = \arg(c(n) \cdot c^*(n-1))$$

$$cs(n) = \langle adc(n) \rangle_\tau \text{ oder } cs(n) = adc(n)$$

wobei n den aktuellen Zeitpunkt und $n-1$ den Zeitpunkt der letzten, vor dem aktuellen Zeitpunkt liegenden Iterationsschleife der jeweiligen Iteration repräsentiert,

wobei $y_1(n)$ das erste Filtersignal oder das geglättete erste Filtersignal in der aktuellen Iterationsschleife ist;

wobei $y_2(n)$ das zweite Filtersignal oder das geglättete zweite Filtersignal in der aktuellen Iterationsschleife ist;

wobei $cs(n)$ das Steuersignal in der aktuellen Iterationsschleife ist;

wobei $\langle adc(n) \rangle$ ein geglätteter Wert von $adc(n)$ ist, wobei die Glättung vorzugsweise mittels eines Tiefpass-IIR-Filters oder eines Tiefpass-FIR-Filters durchgeführt wird.

[0025] Es sind jedoch auch andere Varianten zur Ermittlung des Steuersignals denkbar, sofern das Steuersignal anzeigt, ob die entsprechende Phasendifferenz bzw. geglättete Phasendifferenz positiv oder negativ ist.

[0026] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform werden aus dem entsprechenden Zeitsignal gleichzeitig mehrere darin enthaltene periodische Signalanteile extrahiert. In diesem Fall werden mehrere der obigen Iterationen gleichzeitig durchgeführt, wobei jede Iteration eine andere initiale Frequenz hat.

[0027] Das erfindungsgemäße Verfahren kann zur Analyse von beliebigen Zeitsignalen genutzt werden. In einer besonders bevorzugten Ausführungsform wird mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ein akustisches

Signal und insbesondere ein Sprachsignal als Zeitsignal verarbeitet, wobei in diesem Fall die initiale Frequenz einer jeweiligen Iteration zwischen 80 Hz und 400 Hz liegt.

[0028] Neben dem oben beschriebenen Verfahren betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zur Analyse eines Zeitsignals mit periodischen Signalanteilen, wobei die Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens bzw. einer oder mehrerer bevorzugter Varianten des erfindungsgemäßen Verfahrens eingerichtet ist. Mit anderen Worten enthält die Vorrichtung entsprechende Mittel zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens bzw. bevorzugter Ausführungsformen dieses Verfahrens. Diese Mittel werden vorzugsweise durch geeigneten Programmcode auf einem Rechner realisiert.

[0029] Neben dem oben beschriebenen Verfahren umfasst die Erfindung ferner ein Computerprogrammprodukt mit einem auf einem maschinenlesbaren Träger gespeicherten Programmcode zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens bzw. einer oder mehrerer bevorzugter Varianten des erfindungsgemäßen Verfahrens, wenn der Programmcode auf einem Computer ausgeführt wird. Die Erfindung betrifft darüber hinaus ein Computerprogramm mit einem Programmcode zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens bzw. einer oder mehrerer bevorzugter Varianten des erfindungsgemäßen Verfahrens, wenn der Programmcode auf einem Computer ausgeführt wird.

[0030] Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachfolgend anhand der beigefügten Figuren detailliert beschrieben.

[0031] Es zeigen:

Fig. 1 ein Ablaufdiagramm, das die Schritte einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wiedergibt;

Fig. 2 ein Diagramm, welches die Integration eines Phasensignals zur Bestimmung von Zeitpunkten offenbart, die bei der Glättung verschiedener Größen in dem Verfahren der **Fig. 1** berücksichtigt werden können;

Fig. 3 ein Diagramm, das die Filterung verdeutlicht, die im Verfahren der **Fig. 1** zur Erzeugung entsprechender Filtersignale genutzt wird; und

Fig. 4 eine Darstellung, die mit dem Verfahren der **Fig. 1** erzielte Ergebnisse für verschiedene simulierte Signale verdeutlicht.

[0032] Die hier beschriebene Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens hat das Ziel, in einem Zeitsignal, das durch Signalwerte entlang der Zeitachse repräsentiert wird und periodische Anteile enthält, die Grundfrequenzen dieser Anteile aufzufinden, wobei sich die Grundfrequenzen über die Zeit hinweg verändern können. Das Verfahren kann dabei für beliebige Zeitsignale in unterschiedlichsten Anwendungsgebieten zum Einsatz kommen. In einer bevorzugten Ausführungsform wird das Verfahren für akustische Signale in einem Frequenzbereich zwischen 80 Hz und 400 Hz genutzt, jedoch kann das Verfahren auch für andere Signalarten, wie z.B. Hochfrequenzsignale, verwendet werden.

[0033] In der hier beschriebenen Ausführungsform werden die Schritte des Verfahrens digital durchgeführt, so dass das Zeitsignal ein digitales bzw. digitalisiertes Signal darstellt. Dieses Zeitsignal, das das Eingangssignal des hier beschriebenen Verfahrens ist, wird in dem Ablaufdiagramm der **Fig. 1** mit $x(t)$ bezeichnet, wobei t die Zeit repräsentiert. Das Verfahren wird nachfolgend anhand eines Beispiels beschrieben, bei dem eine einzelne Grundfrequenz aus dem Signal $x(t)$ mittels einer Iteration extrahiert wird. Das Verfahren lässt sich jedoch problemlos auch auf die Extraktion von mehreren Grundfrequenzen erweitern, wobei dann parallel oder seriell mehrere Iterationen durchgeführt werden, die sich in ihren initialen Frequenzen ausreichend unterscheiden, so dass sie hin zu unterschiedlichen Grundfrequenzen konvergieren.

[0034] Dem Verfahren liegt ein Modell für einen entsprechenden periodischen Signalanteil im Zeitsignal zugrunde, wobei das Modell von einer zeitveränderlichen Grundfrequenz $f_0(t)$ des Signalanteils ausgeht. Der entsprechende Signalanteil wird dabei durch folgende Summe beschrieben:

$$x(t) = \sum_{n=1}^{N_p} \alpha_n \sin(n\varphi(t) - \varphi_{0,n}) \quad (1)$$

$$f_0(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt}$$

[0035] Dabei ist $f_0(t)$ die entsprechende Grundfrequenz, die als Ableitung der instantanen Phase $\varphi(t)$ berechnet wird. In dem Signalanteil sind neben der Grundfrequenz ($n=1$) mehrere Harmonische ($n = 2, \dots, N_p$) der Grundfrequenz enthalten. Die entsprechenden Amplituden für die Grundfrequenz und die Harmonischen sind in der Gleichung (1) mit a_n bezeichnet, wohingegen die Phasen mit $\varphi_{0,n}$ benannt sind.

[0036] Im Rahmen des hier beschriebenen Verfahrens wird eine Frequenz kontinuierlich verändert, so dass sie sich auf die Grundfrequenz $f_0(t)$ bzw. die entsprechende Periode $T_0 = 1/f_0$ einregelt. Im Unterschied zu bekannten PLL-Verfahren wird kein Referenzsignal als ein Modulator zum Ableiten eines Regelsignals benötigt. Stattdessen wird das obige Signalmodell explizit verwendet, um einen perioden-synchronen Modulationsfilter zu definieren, der bei Anwendung auf das Zeitsignal $x(t)$ ein phasenbasiertes Steuersignal liefert, mit dem eine Regelschleife geeignet angepasst wird. Das Verfahren regelt sich dabei sehr schnell auf eine Schätzung der Grundfrequenz $f_0(t)$ ein. Mit anderen Worten werden im nachfolgend erläuterten Verfahren iterativ entsprechende Frequenzschätzungen $f_c(t) = \hat{f}_0(t)$ für die Grundfrequenz ermittelt, wobei das Verfahren nach kurzer Zeit auch die tatsächliche Grundfrequenz des entsprechenden Signalanteils liefert.

[0037] Vor der Beschreibung der einzelnen Schritte des Verfahrens der **Fig. 1** wird zunächst das Konzept der perioden-synchronen Integration zur Gewinnung von Referenzzeitpunkten aus der geschätzten Frequenz $f_c(t)$ erläutert. Diese perioden-synchrone Integration kann bei der Glättung verschiedener Größen im Rahmen des hier beschriebenen Verfahrens genutzt werden.

[0038] Die perioden-synchrone Integration hat das Ziel, dass Abtastwerte bzw. Abtastzeitpunkte für die Glättung eines entsprechenden Signals synchron an die sich verändernde Frequenz f_c angepasst werden. Dabei wird folgende Phasenfunktion $\Phi(t)$ durch numerische Integration bestimmt:

$$\phi(t) = \int_0^t f_c(t') dt' \quad (2)$$

[0039] Ein Beispiel einer solchen Phasenfunktion, normalisiert über 2π und Modulo 1, ist in dem Diagramm der **Fig. 2** wiedergegeben. Dabei ist der Fall einer Frequenz f_c gezeigt, die sich über die Zeit t linear erhöht. Diese Frequenz wird durch die Linie L1 repräsentiert, wobei die entsprechenden Frequenzwerte in **Fig. 2** entlang der linken Ordinate aufgetragen sind. Die sich für diesen Frequenzverlauf ergebenden Phasen sind durch gestrichelte Linien L2 angedeutet, wobei die entsprechenden Phasenwerte entlang der rechten Ordinate der **Fig. 2** wiedergegeben sind. Wie man erkennt, fällt die Phase regelmäßig auf den Wert 0 zurück, was in **Fig. 2** durch entsprechende vertikale Linien L3 angedeutet ist. Aufgrund der linearen Erhöhung der Frequenz f_c entlang der Zeit t weisen die entsprechenden Nullpunkte der Phase einen abnehmenden Abstand auf. Die Zeitpunkte, zu denen die Phase Null wird, stellen Referenzzeitpunkte dar. Eine Anzahl von n hintereinander liegenden Referenzzeitpunkten wird dabei durch folgende Zeitreihe beschrieben:

$$T_s(t) = \{t_{s,1}, t_{s,2}, t_{s,3}, \dots, t_{s,n}\} \quad (3)$$

[0040] Dabei bezeichnet $t_{s,1}$ den ersten Referenzzeitpunkt und $t_{s,n}$ den letzten Referenzzeitpunkt, bevor der gerade betrachtete aktuelle Zeitpunkt t auftritt. Mit den obigen Referenzzeitpunkten kann allgemein eine perioden-synchrone Glättung eines zeitlich veränderlichen Signals $s(t)$ wie folgt durchgeführt werden:

$$t' = t - t_{s,n} \quad (4a)$$

$$b_{SI}(t') = l_{p_\tau} \left(s(t_{s,n} + t'), s(t_{s,n-1} + t'), s(t_{s,n-2} + t'), \dots, s(t_{s,n-N} + t') \right) \quad (4b)$$

$$s_{SI}(t) = b_{SI}(t') \quad (4c)$$

[0041] In den obigen Gleichungen bezeichnet t den aktuellen Zeitpunkt, wohingegen t' die Zeitspanne darstellt, die seit dem Auftreten des letzten Referenzzeitpunkts $t_{s,n}$ abgelaufen ist. $l_{p_\tau}(\cdot)$ ist ein an sich bekannter Tiefpass-IIR-Filter mit der Zeitkonstanten τ . Alternativ kann auch ein Tiefpass-FIR-Filter mit entsprechender Zeitkonstanten genutzt werden. Das (perioden-synchron) geglättete Signal ist mit $s_{SI}(t)$ bezeichnet. Die obige Gleichung (4b) bedeutet, dass das Signalsegment, das an jedem Referenzzeitpunkt beginnt, kontinuierlich in einem Signalpuffer gemittelt wird, was die Wellenform eines periodischen Signalanteils entsprechend der (stabilisierten) Periode der aufeinander folgenden Referenzzeitpunkte verstärkt, wohingegen andere Signalkomponenten unterdrückt werden. Die Ordnung des verwendeten Tiefpass-IIR-Filters entspricht der Anzahl an Signalwerten, die in Gleichung (4b) berücksichtigt werden.

[0042] Demzufolge sind vor dem aktuellen Zeitpunkt liegende Referenzzeitpunkte nur relevant, wenn die Ordnung des Tiefpass-IIR-Filters größer als Eins ist. In der hier beschriebenen Ausführungsform wurde ein Tiefpass-IIR-Filter erster Ordnung genutzt. Das Verfahren ist jedoch problemlos auch mit Tiefpass-IIR-Filtern höherer Ordnung verwendbar, wobei in solche Filter dann mehrere Signale entsprechend Gleichung (4b) einfließen.

[0043] Im Folgenden werden anhand von **Fig. 1** die einzelnen Schritte einer Iteration zur Ermittlung einer entsprechenden Grundfrequenz im Zeitsignal $x(t)$ erläutert. Die Iteration wird in Schritt S0 mit einer initialen Frequenz $f_{c,0}$ begonnen. Die initiale Frequenz ist in Abhängigkeit vom verarbeiteten Zeitsignal $x(t)$ derart gewählt, dass sie innerhalb des Frequenzspektrums des Zeitsignals liegt. Die Iteration wird in aufeinander folgenden Iterationsschleifen durchgeführt, wobei in der ersten Iterationsschleife die initiale Frequenz $f_{c,0}$ als aktuelle Frequenz f_c mit entsprechender Periode T_c verarbeitet wird, wohingegen in der nächsten Iterationsschleife als aktuelle Frequenz f_c diejenige Frequenz verwendet wird, die in der letzten Iterationsschleife adaptiert wurde, wie weiter unten näher erläutert wird. Allgemein wird im Folgenden eine aktuelle Iterationsschleife gemäß den Schritten S1 bis S4 erläutert, wobei die dabei verwendete aktuelle Frequenz f_c aus der letzten Iterationsschleife stammt bzw. die initiale Frequenz $f_{c,0}$ ist.

[0044] Im Schritt S1 der Iteration werden für den aktuellen Zeitpunkt t ein erstes Filtersignal $y_p(t)$ und ein zweites Filtersignal $y_m(t)$ basierend auf folgenden Gleichungen (5a) und (5b) ermittelt:

$$y_p(t) = x(t) + x(t - T_c) \quad (5a)$$

$$y_m(t) = x(t) - x(t - T_c) \quad (5b)$$

$T_c = 1/f_c$ ist die aktuelle Periode. Das erste Filtersignal $y_p(t)$ stellt dabei die Ausgabe eines perioden-konstruktiven Filters und das zweite Filtersignal $y_m(t)$ die Ausgabe eines perioden-suppressiven Filters dar. Wenn die Grundfrequenz f_0 des Signals mit der aktuellen Frequenz f_c übereinstimmt, ist die Ausgabe des perioden-konstruktiven Filters doppelt so groß wie die Eingabe, wohingegen die Ausgabe des perioden-suppressiven Filters verschwindet.

[0045] **Fig. 3** verdeutlicht die Übertragungsfunktion $|H|$ sowie die Phase $\Phi/2\pi$ des perioden-konstruktiven Filters und des perioden-suppressiven Filters gemäß den obigen Gleichungen (5a) und (5b). Die Übertragungsfunktion $|H|$ ist in **Fig. 3** entlang der linken Ordinate wiedergegeben, wohingegen die Phase entlang der rechten Ordinate verläuft. Die durchgezogenen Linien LP und LP' beziehen sich in **Fig. 3** auf den perioden-konstruktiven Filter, der das erste Filtersignal liefert, wohingegen sich die gestrichelten Linien LM und LM' auf den perioden-suppressiven Filter beziehen, der das zweite Filtersignal liefert. Die Linie LP repräsentiert die Übertragungsfunktion des perioden-konstruktiven Filters und die Linie LP' dessen Phase. Demgegenüber repräsentiert die Linie LM die Übertragungsfunktion des perioden-suppressiven Filters und die Linie LM' dessen Phase.

[0046] Wenn die Grundfrequenz f_0 im Zeitsignal geringer als die aktuelle Frequenz f_c ist (angezeigt durch die Frequenz $f_{0,1}$ in **Fig. 3**) oder wenn die Grundfrequenz f_0 größer als die aktuelle Frequenz f_c ist (ange-

zeigt durch die Frequenz $f_{0,1}$ in **Fig. 3**), ist das Verhältnis der Amplituden $\left| \frac{y_p(t)}{y_m(t)} \right|$ der Filtersignale kleiner als

für den Fall, dass f_c und f_0 übereinstimmen. Dieses Verhältnis nimmt ab, je größer der Unterschied zwischen f_c und f_0 ist. Aus **Fig. 3** erkennt man ferner, dass die Phasendifferenz zwischen dem ersten Filtersignal $y_p(t)$ (Linie LP') und dem zweiten Filtersignal $y_m(t)$ (Linie LM') $+90^\circ$ ist, wenn f_0 kleiner als f_c ist, wohingegen die Phasendifferenz im Falle, dass f_0 größer als f_c ist, -90° beträgt. Es tritt somit ein Sprung in den Phasendifferenzen auf, wenn $f_0 = f_c$ gilt. Dieser Sprung tritt sowohl bei der Grundfrequenz als auch bei deren Harmonischen auf.

[0047] Erfindungsgemäß wird die obige Phasendifferenz als Steuersignal genutzt, um iterativ die aktuelle Frequenz f_c an die Grundfrequenz f_0 im Signal $x(t)$ anzunähern. Wie weiter unten noch näher beschrieben, wird dabei die aktuelle Frequenz f_c erniedrigt, wenn die Phasendifferenz positiv ist, wohingegen sie erhöht wird, wenn die Phasendifferenz negativ ist.

[0048] Bevor das Steuersignal berechnet wird, werden in der hier beschriebenen Ausführungsform zunächst die Schritte S2 und S3 der **Fig. 1** durchgeführt. In Schritt S2 der Iteration werden ein geglättetes erstes Filtersignal $y_{p,S1}$ und ein geglättetes zweites Filtersignal $y_{m,S1}$ gemäß der Glättung basierend auf den obigen

Gleichungen (4a) bis (4c) ermittelt. Die Zeitkonstante τ des Tiefpass-IIR-Filters $lp_\tau(\cdot)$ wurde dabei auf $1,0 \cdot T_c$ gesetzt. Anschließend wird in Schritt S3 für diese geglätteten Filtersignale das HNR-Verhältnis (HNR = Harmonics to Noise Ratio) ermittelt, das wie folgt gegeben ist:

$$HNR(t) = \frac{\left\langle |y_{p,SI}(t)|^2 \right\rangle_\tau}{\left\langle |y_{m,SI}(t)|^2 \right\rangle_\tau} \quad (6)$$

[0049] Dabei bezeichnet $\langle \cdot \rangle_\tau$ wiederum eine Glättung mit der Tiefpass-IIR-Filterung gemäß obiger Gleichung (4b), wobei die Zeitkonstante auf $\tau = 0,5 \cdot T_c$ gesetzt wurde. In der hier beschriebenen Ausführungsform wurde das HNR-Verhältnis selbst nochmals mit der Tiefpass-IIR-Filterung gemäß obiger Gleichung (4b) geglättet, wobei die Zeitkonstante auf $\tau = 0,05 \cdot T_c$ gesetzt wurde.

[0050] Das gemäß Schritt S3 ermittelte HNR-Verhältnis gibt Aufschluss darüber, ob die aktuelle Frequenz f_c hin zur Grundfrequenz f_0 konvergiert. Dies ist dann der Fall, wenn sich das HNR-Verhältnis auf einen konstanten Wert deutlich größer als 0 stabilisiert. Diese Information kann genutzt werden, um die aktuelle Frequenz f_c als Grundfrequenz f_0 zu identifizieren, wie weiter unten noch erläutert wird.

[0051] Nach Ermittlung des HNR-Verhältnisses wird in Schritt S4 der Iteration das Steuersignal $cs(n)$ berechnet. Wesentlich ist dabei, dass das Steuersignal angibt, ob die Phasendifferenz zwischen dem Filtersignal $y_{p,SI}(t)$ und dem Filtersignal $y_{m,SI}(t)$ positiv oder negativ ist. Im Falle einer negativen Phasendifferenz ist die tatsächliche Grundfrequenz f_0 größer als f_c , wohingegen im Falle einer positiven Phasendifferenz die tatsächliche Grundfrequenz f_0 kleiner als f_c ist. Dies bedeutet, dass im Falle einer negativen Phasendifferenz die Frequenz f_c erhöht werden muss und im Falle einer positiven Phasendifferenz die Frequenz f_c erniedrigt werden muss, um sich der Grundfrequenz f_0 des Signals anzunähern.

[0052] Die obigen Phasendifferenz bzw. das entsprechende Steuersignal $cs(n)$ wird in der hier beschriebenen Ausführungsform basierend auf folgenden Gleichungen ermittelt:

$$c(n) = y_{p,SI}(n) + iy_{m,SI}(n) \quad (7a)$$

$$adc(n) = \arg(c(n) \cdot c^*(n-1)) \quad (7b)$$

$$cs(n) = \langle adc(n) \rangle_\tau \quad (7c)$$

[0053] In den obigen Gleichungen bezeichnet n die aktuelle Iterationsschleife bzw. den aktuellen Zeitpunkt im Zeitsignal und $n-1$ die vorhergehende Iterationsschleife bzw. den vorhergehenden Zeitpunkt im Zeitsignal. Gemäß der obigen Gleichung (7a) wird eine komplexe Zahl gebildet, die als Realteil das Filtersignal $y_{p,SI}(n)$ und als Imaginärteil das Filtersignal $y_{m,SI}(n)$ umfasst. Die Multiplikation dieser komplexen Zahl mit ihrem Komplex-Konjugierten zum vorhergehenden Zeitpunkt gibt an, ob sich der Vektor der komplexen Zahl gegen den Uhrzeigersinn (positive Phasendifferenz) oder im Uhrzeigersinn (negative Phasendifferenz) bewegt. Demzufolge gibt das Vorzeichen der Größe $adc(n)$ an, ob eine positive Phasendifferenz (positives Vorzeichen) oder eine negative Phasendifferenz (negatives Vorzeichen) vorliegt. Das Steuersignal ist dabei die Größe $adc(n)$ nach der Durchführung einer Glättung mit der Zeitkonstante τ , wobei die Glättung wiederum mit dem oben beschriebenen Tiefpass-IIR-Filter gemäß Gleichung (4b) durchgeführt wurde. Im hier beschriebenen Ausführungsbeispiel wurde die Zeitkonstante τ für die Glättung von $adc(n)$ auf $0,1 \cdot T_c$ gesetzt.

[0054] Die Information über die positive und negative Phasendifferenz wird in Schritt S4 zur Adaption von f_c genutzt. Allgemein wird dabei f_c im Falle einer negativen Phasendifferenz vergrößert und im Falle einer positiven Phasendifferenz verkleinert. Im hier beschriebenen Ausführungsbeispiel wird diese Vergrößerung bzw. Verkleinerung mit Hilfe eines Faktors erreicht, der größer als Eins ist. Im Falle einer negativen Phasendifferenz wird f_c mit dem Faktor multipliziert, wohingegen f_c im Falle einer positiven Phasendifferenz durch den Faktor geteilt wird. Die geeignete Wahl dieses Faktors liegt im Rahmen von fachmännischem Handeln. In einer bevorzugten Variante wird der Faktor wie folgt gewählt:

$$fa = 2^{1/16 \cdot f_c / f_s}$$

wobei fa der Faktor, f_s die Abtastfrequenz des digitalen Zeitsignals $x(t)$ und f_c die aktuelle Frequenz ist.

[0055] Nach entsprechender Adaption der Frequenz f_c in Schritt S4 wird eine neue Iterationsschleife mit Schritt S1 begonnen, wobei nunmehr die zuvor in Schritt S4 ermittelte Frequenz als neue aktuelle Frequenz f_c verwendet wird.

[0056] Im Falle, dass sich das HNR-Verhältnis auf einen höheren Wert stabilisiert, ist davon auszugehen, dass die aktuelle Frequenz der Grundfrequenz entspricht. Dies kann in einer Ausführungsform der Erfindung derart genutzt werden, dass im Falle, dass das HNR-Verhältnis in der aktuellen Iterationsschleife oder gegebenenfalls in der aktuellen und mehreren vorhergehenden Iterationsschleifen einen vorbestimmten Schwellwert überschreitet, die aktuelle Frequenz f_c als Grundfrequenz f_0 identifiziert wird und beispielsweise über eine entsprechende Benutzerschnittstelle ausgegeben wird.

[0057] Das oben beschriebene Verfahren wurde von dem Erfinder anhand mehrerer simulierter Zeitsignale getestet. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass die im entsprechenden Zeitsignal enthaltenen Grundfrequenzen gut erkannt werden. Beispielhaft ist das Ergebnis einer entsprechenden Simulation in **Fig. 4** wiedergegeben. Diese Figur zeigt insgesamt sechs Diagramme DI1, DI1', DI2, DI2', DI3 und DI3'. Alle Diagramme beziehen sich auf die Verarbeitung eines Signals in der Form eines harmonischen komplexen Tons mit einer Dauer von 400 ms und einer Grundfrequenz f_0 , welche abrupt von 98,5 Hz auf 101 Hz bei 200 ms wechselt. Die Diagramme DI1 und DI1' beziehen sich dabei auf ein Signal mit einem Signal-Rausch-Verhältnis von 21,5 dB, die Diagramme DI2 und DI2' auf ein Signal mit einem Signal-Rausch-Verhältnis von 7,5 dB und die Diagramme DI3 und DI3' auf ein Signal mit einem Signal-Rausch-Verhältnis von 1,5 dB. Mit anderen Worten nimmt das Signal-Rausch-Verhältnis der Signale in **Fig. 4** von den linken zu den rechten Diagrammen ab. Die oberen Diagramme DI1 bis DI3 zeigen die zeitliche Entwicklung der Frequenz f_c , die aus dem entsprechenden Signal mit einer Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens extrahiert wird. Dabei ist die Differenz zwischen f_c und dem Frequenzwert $f_{0,\min} = 96$ Hz wiedergegeben. Die unteren Diagramme DI1' bis DI3' zeigen die zeitliche Entwicklung des HNR-Verhältnisses, das aus dem entsprechenden Signal mit der Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens gewonnen wird.

[0058] Wie man aus den oberen Diagrammen DI1 bis DI3 sehr gut erkennt, konvergiert das Verfahren sehr schnell zu der im Signal enthaltenen Grundfrequenz von 98,5 Hz ($f_c - f_{0,\min} = 2,5$ Hz). Ebenso wird der abrupte Frequenzwechsel bei 200 ms auf 101 Hz sehr gut erkannt ($f_c - f_{0,\min} = 5$ Hz). Ferner wird aus den unteren Diagrammen DI1' bis DI3' gut ersichtlich, dass das HNR-Verhältnis bei dem Wechsel der Frequenz kurz einbricht und sich anschließend schnell wieder auf einem hohen Niveau stabilisiert. Darüber hinaus wird in **Fig. 4** deutlich, dass das Verfahren auch bei schlechter Signalqualität mit geringem Signal-Rausch-Verhältnis die entsprechenden Grundfrequenzen erkennt.

[0059] Die im Vorangegangenen beschriebene Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens weist eine Reihe von Vorteilen auf. Insbesondere nähert sich das Verfahren sehr schnell an die Grundfrequenzen von periodische Signalanteilen in dem verarbeiteten Zeitsignal an. Diskontinuitäten in der Periodizität des Signals werden dabei gut durch einen Abfall des ermittelten HNR-Verhältnisses erkannt. Darüber hinaus ist das Verfahren robust gegen Rauschen im verarbeiteten Zeitsignal, d.h. auch bei schlechtem Signal-Rausch-Verhältnis regelt sich das Verfahren auf entsprechende Grundfrequenzen ein.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Analyse eines Zeitsignals ($(x(t))$) mit periodischen Signalanteilen, bei dem für aufeinander folgende Zeitpunkte im Zeitsignal ($(x(t))$) jeweils mittels einer oder mehrerer Iterationen jeweils Frequenzen und den Frequenzen zugeordnete Signalparameter (HNR) ausgehend von einer initialen Frequenz ($f_{c,0}$) aus dem Zeitsignal ($(x(t))$) extrahiert werden, wobei für eine aktuelle Frequenz (f_c) in einer aktuellen Iterationsschleife einer jeweiligen Iteration für einen aktuellen Zeitpunkt der aufeinander folgenden Zeitpunkte folgende Schritte durchgeführt werden

a) Ermitteln eines ersten Filtersignals (y_p) und eines zweiten Filtersignals (y_m) basierend auf einem Eingangssignal, das das Zeitsignal ($(x(t))$) oder ein geglättetes Zeitsignal ist, wobei das erste Filtersignal (y_p) die Summe aus dem Eingangssignal zum aktuellen Zeitpunkt und dem Eingangssignal zu dem Zeitpunkt repräsentiert, der eine Periode gemäß der aktuellen Frequenz (f_c) vor dem aktuellen Zeitpunkt liegt, und wobei das zweite Filtersignal (y_m) die Differenz zwischen dem Eingangssignal zum aktuellen Zeitpunkt und dem Eingangssignal zu dem Zeitpunkt repräsentiert, der eine Periode gemäß der aktuellen Frequenz (f_c) vor dem aktuellen Zeitpunkt liegt;

b) Ermitteln des Signalparameters (HNR) für die aktuelle Frequenz (f_c) als eine Größe, die das Verhältnis oder das geglättete Verhältnis eines Signalstärkemaßes oder eines geglätteten Signalstärkemaßes des ersten Filtersignals (y_p) oder eines geglätteten ersten Filtersignals ($y_{p,SI}$) zu einem Signalstärkemaß oder

einem geglätteten Signalstärkemaß des zweiten Filtersignals (y_m) oder eines geglätteten zweiten Filtersignals ($y_{m,SI}$) anzeigt;

c) Ermitteln eines Steuersignals ($cs(n)$), das anzeigt, ob eine Phasendifferenz positiv oder negativ ist, wobei die Phasendifferenz die Phasendifferenz oder eine geglättete Phasendifferenz zwischen dem ersten Filtersignal (y_p) oder dem geglätteten ersten Filtersignals ($y_{p,SI}$) und dem zweiten Filtersignal (y_m) oder dem geglätteten zweiten Filtersignals ($y_{m,SI}$) ist;

d) Modifikation der aktuellen Frequenz (f_c), indem sie vergrößert wird, wenn das Steuersignal ($cs(n)$) eine negative Phasendifferenz anzeigt, und indem sie verkleinert wird, wenn das Steuersignal ($cs(n)$) eine positive Phasendifferenz anzeigt, wobei die modifizierte Frequenz als die aktuelle Frequenz (f_c) in der nächsten Iterationsschleife verwendet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Falle, dass der Signalparameter (HNR) in der aktuellen Iterationsschleife oder über mehrere Iterationsschleifen umfassend die aktuelle Iterationsschleife und eine vorbestimmte Anzahl von früheren Iterationsschleifen hinweg oder der über die mehreren Iterationsschleifen gemittelte Signalparameter (HNR) einen vorbestimmten Schwellwert überschreitet, die aktuelle Frequenz (f_c) als eine Grundfrequenz (f_o) im Zeitsignal ($(x(t))$) identifiziert wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass das geglättete Zeitsignal und/oder das geglättete erste Filtersignal ($y_{p,SI}$) und/oder das geglättete zweite Filtersignals ($y_{m,SI}$) und/oder das geglättete Verhältnis und/oder das geglättete Signalstärkemaß des ersten Filtersignals (y_p) oder des geglätteten ersten Filtersignals ($y_{p,SI}$) und/oder das geglättete Signalstärkemaß des zweiten Filtersignals (y_m) oder des geglätteten zweiten Filtersignals ($y_{m,SI}$) und/oder die geglättete Phasendifferenz mittels einer Glättung basierend auf einem Tiefpass-IIR-Filter ermittelt werden.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die aktuelle Frequenz (f_c) in Schritt d) mittels eines Faktors größer Eins modifiziert wird, wobei zur Vergrößerung der aktuellen Frequenz (f_c) diese mit dem Faktor multipliziert wird und wobei zur Verkleinerung der aktuellen Frequenz (f_c) diese durch den Faktor geteilt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass Faktor von der aktuellen Frequenz (f_c) abhängt und umso größer wird, je größer die aktuelle Frequenz (f_c) ist.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Steuersignal in Schritt c) wie folgt ermittelt wird:

$$c(n) = y_1(n) + iy_z(n)$$

$$adc(n) = \arg(c(n) \cdot c^*(n-1))$$

$$cs(n) = \langle adc(n) \rangle_\tau \text{ oder } cs(n) = adc(n)$$

wobei n den aktuellen Zeitpunkt und $n - 1$ den Zeitpunkt der letzten, vor dem aktuellen Zeitpunkt liegenden Iterationsschleife der jeweiligen Iteration repräsentiert;

wobei $y_1(n)$ das erste Filtersignal (y_p) oder das geglättete erste Filtersignal ($y_{p,SI}$) in der aktuellen Iterationsschleife ist;

wobei $y_2(n)$ das zweite Filtersignal (y_n) oder das geglättete zweite Filtersignal ($y_{m,SI}$) in der aktuellen Iterationsschleife ist;

wobei $cs(n)$ das Steuersignal ($cs(n)$) in der aktuellen Iterationsschleife ist;

wobei $\langle adc(n) \rangle$ ein geglätteter Wert von $adc(n)$ ist.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass mehrere Iterationen gleichzeitig durchgeführt werden, wobei jede Iteration eine andere initiale Frequenz hat.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass mit dem Verfahren ein akustisches Signal als Zeitsignal ($x(t)$) verarbeitet wird und die initiale Frequenz einer jeweiligen Iteration zwischen 80 Hz und 400 Hz liegt.

9. Vorrichtung zur Analyse eines Zeitsignals ($(x(t))$) mit periodischen Signalanteilen, wobei die Vorrichtung zur Durchführung eines Verfahrens eingerichtet ist, bei dem für aufeinander folgende Zeitpunkte im Zeitsignal ($(x(t))$) jeweils mittels einer oder mehrerer Iterationen jeweils Frequenzen und den Frequenzen

zugeordnete Signalparameter (HNR) ausgehend von einer initialen Frequenz ($f_{c,0}$) aus dem Zeitsignal ($(x(t))$) extrahiert werden, wobei für eine aktuelle Frequenz (f_c) in einer aktuellen Iterationsschleife einer jeweiligen Iteration für einen aktuellen Zeitpunkt der aufeinander folgenden Zeitpunkte folgende Schritte durchgeführt werden:

- a) Ermitteln eines ersten Filtersignals (y_p) und eines zweiten Filtersignals (y_m) basierend auf einem Eingangssignal, das das Zeitsignal ($(x(t))$) oder ein geglättetes Zeitsignal ist, wobei das erste Filtersignal (y_p) die Summe aus dem Eingangssignal zum aktuellen Zeitpunkt und dem Eingangssignal zu dem Zeitpunkt repräsentiert, der eine Periode gemäß der aktuellen Frequenz (f_c) vor dem aktuellen Zeitpunkt liegt, und wobei das zweite Filtersignal (y_m) die Differenz zwischen dem Eingangssignal zum aktuellen Zeitpunkt und dem Eingangssignal zu dem Zeitpunkt repräsentiert, der eine Periode gemäß der aktuellen Frequenz (f_c) vor dem aktuellen Zeitpunkt liegt;
- b) Ermitteln des Signalparameters (HNR) für die aktuelle Frequenz (f_c) als eine Größe, die das Verhältnis oder das geglättete Verhältnis eines Signalstärkemaßes oder eines geglätteten Signalstärkemaßes des ersten Filtersignals (y_p) oder eines geglätteten ersten Filtersignals ($y_{p,SI}$) zu einem Signalstärkemaß oder einem geglätteten Signalstärkemaß des zweiten Filtersignals (y_m) oder eines geglätteten zweiten Filtersignals ($y_{m,SI}$) anzeigt;
- c) Ermitteln eines Steuersignals ($cs(n)$), das anzeigt, ob eine Phasendifferenz positiv oder negativ ist, wobei die Phasendifferenz die Phasendifferenz oder eine geglättete Phasendifferenz zwischen dem ersten Filtersignal (y_p) oder dem geglätteten ersten Filtersignals ($y_{p,SI}$) und dem zweiten Filtersignal (y_m) oder dem geglätteten zweiten Filtersignals ($y_{m,SI}$) ist;
- d) Modifikation der aktuellen Frequenz (f_c), indem sie vergrößert wird, wenn das Steuersignal ($cs(n)$) eine negative Phasendifferenz anzeigt, und indem sie verkleinert wird, wenn das Steuersignal ($cs(n)$) eine positive Phasendifferenz anzeigt, wobei die modifizierte Frequenz als die aktuelle Frequenz (f_c) in der nächsten Iterationsschleife verwendet wird.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Vorrichtung zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 2 bis 8 eingerichtet ist.

11. Computerprogrammprodukt mit einem auf einem maschinenlesbaren Träger gespeicherten Programmcode zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wenn der Programmcode auf einem Computer ausgeführt wird.

12. Computerprogramm mit einem Programmcode zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wenn der Programmcode auf einem Computer ausgeführt wird.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

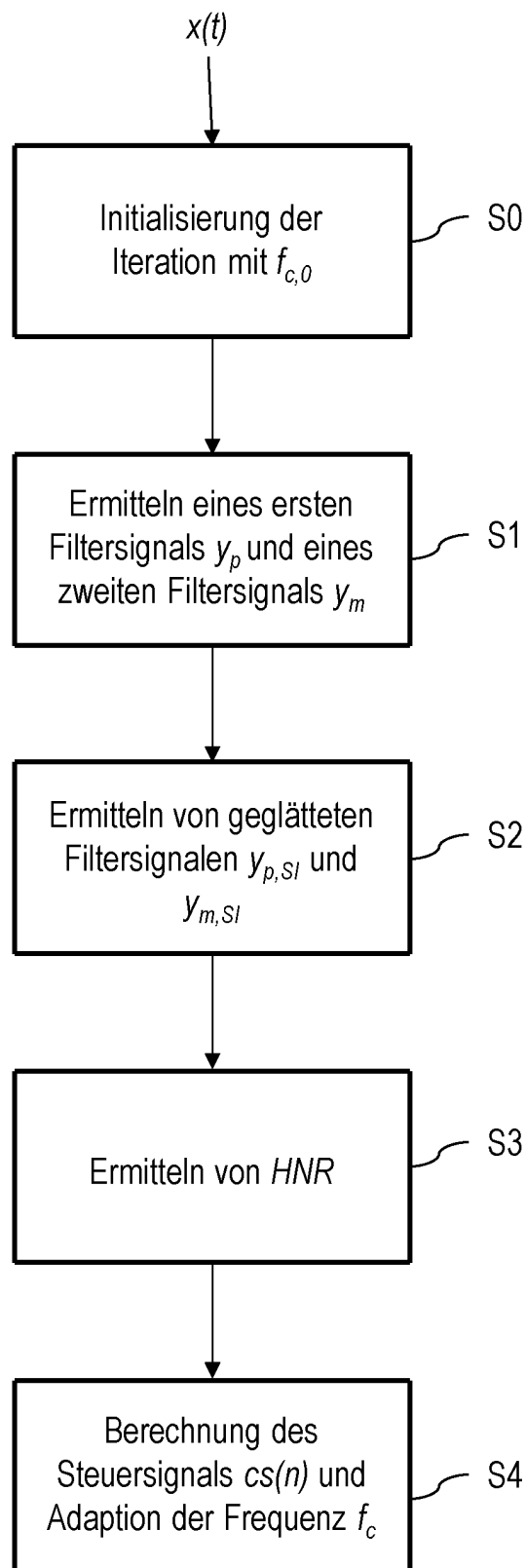


Fig. 1

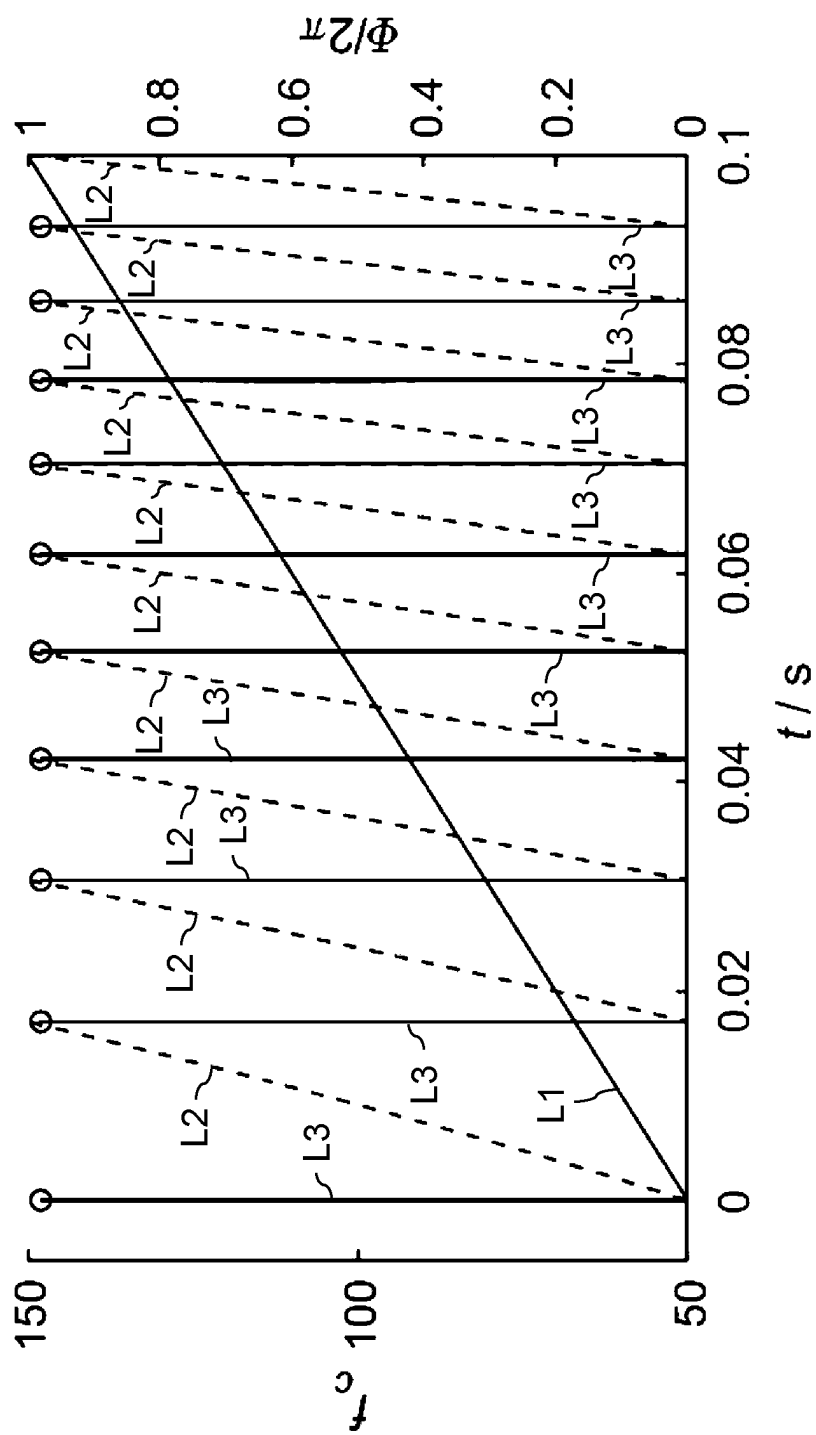


Fig. 2

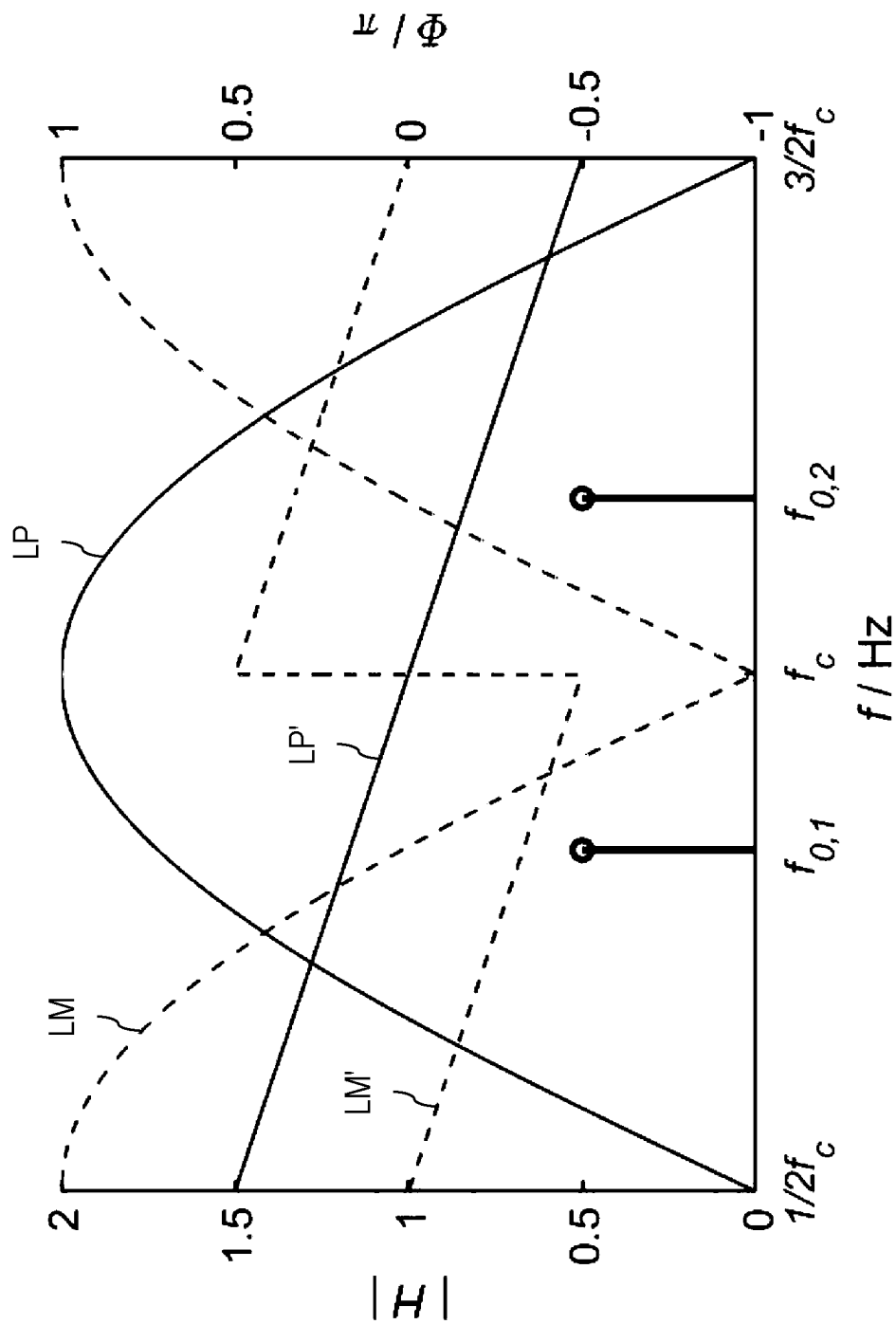


Fig. 3

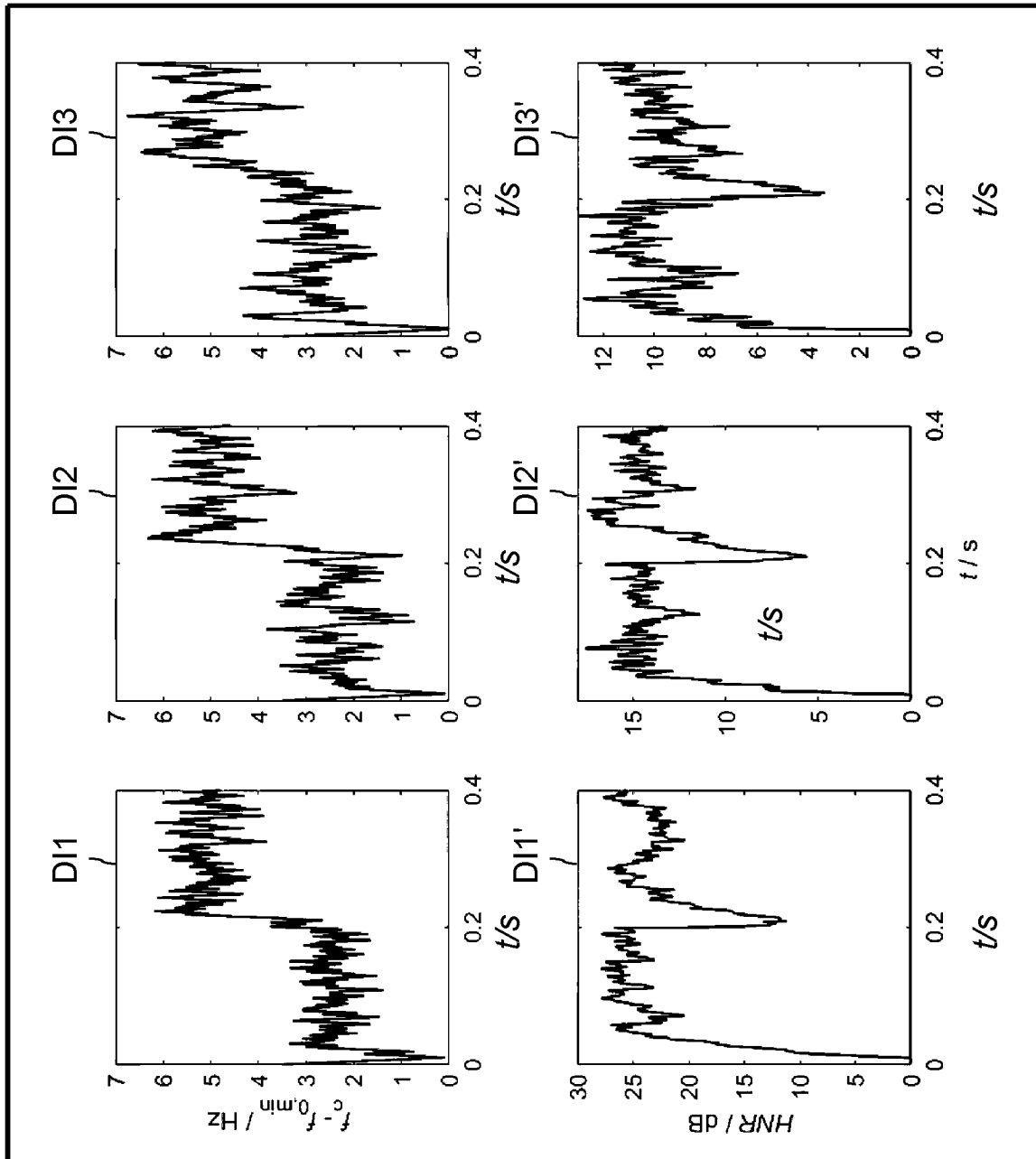


Fig. 4