

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50282/2022
(22) Anmeldetag: 26.04.2022
(43) Veröffentlicht am: 15.10.2023

(51) Int. Cl.: **G06F 30/20** (2020.01)
G01M 15/00 (2006.01)
G01H 17/00 (2006.01)

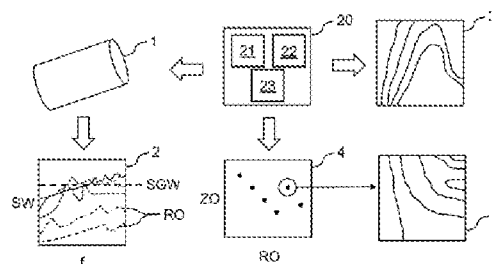
(56) Entgegenhaltungen:
CN 113364172 A
DE 102019125740 B3
CN 109214125 A
CN 108539935 A
CN 111064327 A

(71) Patentanmelder:
AVL List GmbH
8020 Graz (AT)
(72) Erfinder:
MEHRGOU Mehdi MSc.
8054 Seierberg (AT)
MAIER Stefan BSc.
8010 Graz (AT)
GARCIA DE MADINABEITIA MERINO Inigo
8010 Graz (AT)
AHMED Mohamed Essam MSc.
8020 Graz (AT)
MAHROUS Safa BSc.
8700 Leoben (AT)
DUCHI Francesco
8020 Graz (AT)

(74) Vertreter:
Hartinger Mario Dipl.-Ing.
8020 Graz (AT)

(54) **Verfahren und System zum Bewerten eines Elektromotors eines elektrischen Antriebssystems eines Kraftfahrzeugs hinsichtlich seiner im Betrieb hör- und/oder spürbaren Schwingungen**

(57) Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren (30) und ein System (20) zum Bewerten eines Elektromotors (12) eines elektrischen Antriebssystems (11) eines Kraftfahrzeugs (10) hinsichtlich seiner im Betrieb hör- und/oder spürbaren Schwingungen.



Zusammenfassung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren (30) und ein System (20) zum Bewerten eines Elektromotors (12) eines elektrischen Antriebssystems (11) eines Kraftfahrzeugs (10) hinsichtlich seiner im Betrieb hör- und/oder spürbaren Schwingungen.

Fig. 2

Verfahren und System zum Bewerten eines Elektromotors eines elektrischen Antriebssystems eines Kraftfahrzeugs hinsichtlich seiner im Betrieb hör- und/oder spürbaren Schwingungen

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und System zum Bewerten eines Elektromotors eines elektrischen Antriebssystems eines Kraftfahrzeugs hinsichtlich seiner im Betrieb hör- und/oder spürbaren Schwingungen.

Die Verbesserung des Fahrkomforts ist eines der großen Themen für die Zukunft der Mobilität, insbesondere der Elektromobilität. Hör- und/oder spürbare Schwingungen (engl. "Noise Vibration Harshness", kurz NVH) des Elektromotors können den Fahrkomfort dabei bei hoher Lautstärke und starken Vibrationen im Fahrzeuginnenraum des von dem Elektromotor angetriebenen Kraftfahrzeugs entscheidend beeinflussen.

Zur Reduzierung der hör- und/oder spürbaren Schwingungen ist vorab eine Bewertung des Elektromotors hinsichtlich NVH hilfreich. Für diese Bewertung ist es notwendig, die hör- und/oder spürbaren Schwingungen des jeweiligen Elektromotors zu identifizieren. Dies bedeutet, dass ermittelt werden muss, bei welchen Betriebsweisen des Elektromotors (charakterisiert beispielsweise durch Betriebsparameter des Elektromotors) welche hör- und/oder spürbaren Schwingungen auftreten und ggf. wie hoch diese ausfallen. Selbst bei geringfügigen oder einfachen strukturellen Veränderungen am Design des Elektromotors ist dabei eine neue Bewertung des Elektromotors erforderlich.

Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, in kostengünstiger, schneller und einfacher Weise, eine Bewertung eines Elektromotors eines elektrischen Antriebssystems eines Kraftfahrzeugs hinsichtlich der für seinen Fahrkomfort maßgeblichen hör- und/oder spürbaren Schwingungen zu ermöglichen.

Die voranstehende Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1, ein System mit den Merkmalen des Anspruchs 13 sowie ein Computerprogrammprodukt mit den Merkmalen des Anspruchs 14. Weitere Merkmale und Details der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen, der

Beschreibung und den Zeichnungen. Dabei gelten Merkmale und Details, die im Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen Verfahren beschrieben sind, selbstverständlich auch im Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen System sowie dem erfindungsgemäßen Computerprogrammprodukt und jeweils umgekehrt, sodass bzgl. der Offenbarung zu den einzelnen Erfindungsaspekten stets wechselseitig Bezug genommen wird oder werden kann.

Erfindungsgemäß ist ein Verfahren zum Bewerten eines Elektromotors eines elektrischen Antriebssystems eines Kraftfahrzeugs hinsichtlich seiner im Betrieb hör- und/oder spürbaren Schwingungen vorgesehen. Das Verfahren weist dabei die folgenden Schritte auf:

- (a) Bereitstellen, insbesondere Erzeugen, eines Simulationsmodells des Elektromotors,
- (b) Erzeugen eines für den Elektromotor spezifischen und frequenz aufgelösten Schallwert-Datensatzes auf Basis des Simulationsmodells, wobei der Schallwert-Datensatz Schallwerte des Elektromotors unterschiedlichen Frequenzen und unterschiedlichen Raumordnungen des Elektromotors zuweist, wobei die Raumordnungen unterschiedliche Verformungen einer Kraftwelle angeben, die in einem Luftspalt zwischen einem Stator und einem Rotor des Elektromotors auftreten, und
- (c) Bewerten des Elektromotors hinsichtlich seiner im Betrieb hör- und/oder spürbaren Schwingungen durch einen Abgleich der Schallwerte des Schallwert-Datensatzes mit zumindest einem vorgegebenen Schallgrenzwert.

Das erfindungsgemäße Verfahren, welches insbesondere ein computerimplementiertes Verfahren sein kann oder, mit anderen Worten, auf einem Computer oder mehreren Computern ausgeführt werden kann, stellt damit im Ergebnis eine schnelle Bewertung eines Elektromotors hinsichtlich NVH bereit.

Dazu wird von dem Simulationsmodell ausgehend der frequenz aufgelöste Schallwert-Datensatz erzeugt, welcher spezifisch für den vom Simulationsmodell simulierten Elektromotor ist oder, mit anderen Worten, eine NVH-Charakteristik oder NVH-DNA des Elektromotors angibt. Mit den Frequenzen des Schallwert-Datensatzes sind dabei insbesondere Anregungsfrequenzen des Elektromotors beim

Betrieb gemeint. Für die Erzeugung des Schallwert-Datensatzes kann der Elektromotor, insbesondere sein Stator, künstlichen Kräften, insbesondere Zug- und Druckkräften, ausgesetzt werden, die für die Verformungen gemäß der Raumordnungen sorgen. Dabei können die Kräfte hinsichtlich ihrer Richtung und/oder ihres Angriffspunktes am Stator entlang des Umfangs des Stators variiert werden. Wegen den künstlichen Kräften wird insbesondere die Oberfläche des Stators verformt und so ein Schall ermittelbar, der von dem Stator und damit von dem Elektromotor ausgeht. Dieser Schall kann in Form des Schallwerts angegeben werden, welcher wiederum beispielsweise ein Schalldruck, eine Schallleistung, eine Lautstärke, beispielsweise in Dezibel, oder eine andere Einheit oder eine Kombination von Einheiten sein kann.

Der Schallwert-Datensatz kann einen Verlauf von Schallwerten über einer Frequenz, insbesondere einer Anregungsfrequenz des Elektromotors, insbesondere des Stators, für Raumordnungen abbilden. Der Schallwert-Datensatz kann beispielsweise durch eine zweidimensionale graphische Repräsentation abgespeichert oder abbildbar sein, bei dem die Schallwerte und die Frequenzen oder diesen zuordenbare Zeitordnungen auf den Koordinatenachsen eines zweidimensionalen Koordinatensystems abgetragen sein können. Die einzelnen Raumordnungen können als Achsen auf dem Koordinatensystem abgetragen sein, sodass jeweils abgelesen werden kann, welchen Schallwert die jeweilige Raumordnung bei welcher Frequenz oder Zeitordnung aufweist.

Anhand des frequenz aufgelösten Schallwert-Datensatzes erfolgt schließlich die Bewertung durch Abgleich mit zumindest einem Schallgrenzwert. Der Schallgrenzwert wird vorgegeben, wobei er frei gewählt werden kann. Der Schallgrenzwert kann dabei so gewählt werden, dass damit nur solche hör- und/oder spürbaren Schwingungen oder, mit anderen Worten, ein solches NVH-Verhalten bei der Bewertung berücksichtigt wird, welches im Fahrbetrieb des Kraftfahrzeugs zu von den Passagieren des Kraftfahrzeugs hörbaren Geräuschen und/oder wahrnehmbaren Vibrationen führt. Insbesondere ist es möglich, den Schallgrenzwert so zu wählen, dass damit nur solche hör- und/oder spürbaren Schwingungen von der Bewertung erfasst werden, welche im Fahrbetrieb des Kraftfahrzeugs störend erscheinen. Damit ist gemeint, dass nur von den Passagieren des Kraftfahrzeugs hinreichend hörbare, also hinreichend laute, Schwingungen, oder hinreichend spürbare Schwingungen von der Bewertung erfasst werden.

Demnach ermöglicht das erfindungsgemäße Verfahren durch eine entsprechende Vorgabe des Schallgrenzwerts eine intelligente Bewertung durch Selektion von hör- und/oder spürbaren Schwingungen anhand des Schallgrenzwerts. Alternativ oder zusätzlich ist es jedoch auch möglich, in einer weiteren Bewertung die den Schallgrenzwert überschreitenden Schallwerte gesondert zu gewichten und in die Bewertung einfließen zu lassen. Beispielsweise können so besonders hohe Schallwerte stärker bei der Bewertung berücksichtigt werden als kleinere Schallwerte, die den Schallgrenzwert überschreiten.

Es ist vorteilhaft, wenn der zumindest eine Schallgrenzwert ein absoluter Grenzwert eines Schallwerts ist. Dann ist eine besonders einfache Bewertung des Elektromotors hinsichtlich seines NVH-Verhaltens möglich.

Vorteilhaft ist aber auch, wenn der zumindest eine Schallgrenzwert ein relativer Grenzwert eines Schallwerts in Abhängigkeit von der Frequenz ist. Ein solcher relativer Schallgrenzwert kann alternativ oder zusätzlich zu einem absoluten Grenzwert verwendet werden. Der relative Schallgrenzwert kann als ein Verlauf oder eine Angabe gemäß einer Zuordnungsvorschrift, beispielsweise in Form einer Funktion oder einer Zuordnungstabelle, von Schallwert über Frequenz ausgebildet sein. So können für unterschiedliche Frequenzen individuelle Schallgrenzwerte angegeben werden. Dies hat den Vorteil, dass die Bewertung auf die Frequenzen angepasst erfolgen kann. So kann die Schallwertgrenze bei im Betrieb des Elektromotors häufig vorkommenden Frequenzen beispielsweise geringer angesetzt werden als bei im Betrieb selten vorkommenden Frequenzen. Dazu kann der relative Grenzwert insbesondere von einem realen Fahrzyklus des Kraftfahrzeugs und damit einem typischen Betrieb des Elektromotors ermittelt werden und entsprechend abhängig sein. Die Signifikanz von im Betrieb selten auftretender Frequenzen kann dann, trotz womöglich hoher Schallwerte bei diesen Frequenzen, für die Bewertung gesenkt werden. Wiederum kann durch die Festlegung des individuellen Grenzwerts pro Frequenz festgelegt werden, dass bei besonders hohen Schallwerten, trotz seltenen Auftretens im Betrieb, eine entsprechend starke Berücksichtigung bei der Bewertung erfolgt. Insgesamt erlaubt der relative Grenzwert damit auf vielfältige Art und Weise eine praxisnähere NVH-Bewertung des Elektromotors anhand seines tatsächlichen Einsatzes, insbesondere des realen Fahrzyklus des Kraftfahrzeugs.

Auch ist vorteilhaft, wenn für die Bewertung eine Anzahl von Überschreitungen des zumindest einen vorgegebenen Schallgrenzwerts durch die Schallwerte des Schallwert-Datensatzes berücksichtigt wird. Das bedeutet, dass nicht nur ein Überschreiten eines Schallgrenzwerts durch einen Schallwert in die Bewertung einfließt, sondern auch berücksichtigt wird, wie oft ein Schallgrenzwert überschritten wird. Hierzu kann zumindest ein weiterer Grenzwert vorgegeben werden, der eine Vorgabe für die Anzahl von Überschreitungen des Schallgrenzwerts ist. Anhand des zumindest einen weiteren Grenzwerts lässt sich ein signifikanteres Bewertungsergebnis für das NVH-Verhalten des Elektromotors bestimmen. Insbesondere können mehrere weitere Grenzwerte festgelegt werden, um eine quantitative Bewertung zu ermöglichen. So lässt sich anhand einer jeweiligen Anzahl von Überschreitungen des Schallgrenzwerts im Abgleich mit den mehreren weiteren Grenzwerten in quantitativer Hinsicht bewerten, wie stark die hör- und/oder spürbaren Schwingungen des Elektromotors sind.

Vorteilhaft ist ferner, wenn anhand des Schallgrenzwerts eine qualitative Bewertung des Elektromotors durchgeführt wird. In diesem Falle liegt nur ein Schallgrenzwert vor. Diese qualitative Bewertung kann insbesondere zum Erhalten eines ersten, groben Bewertungsergebnisses dienen. Mit qualitativ ist dabei gemeint, dass anhand des Schallgrenzwerts durch die Bewertung nur bestimmt wird, ob der Elektromotor in Bezug auf NVH als ordnungsgemäß oder nicht ordnungsgemäß gilt, was auch als Bewertungsergebnis bezeichnet werden kann. Beim Letzteren kann dann eine entsprechende Änderung des Simulationsmodells durchgeführt werden, wie sie später näher im Detail erläutert wird. Auch hier ist die Berücksichtigung eines weiteren Grenzwerts, der eine Vorgabe für die Anzahl von Überschreitungen des Schallgrenzwerts ist, möglich, um zu bestimmen, ob der Elektromotor in Bezug auf NVH als ordnungsgemäß oder nicht ordnungsgemäß gilt.

Außerdem ist vorteilhaft, wenn anhand mehrerer Schallgrenzwerte eine quantitative Bewertung des Elektromotors durchgeführt wird. Diese quantitative Bewertung kann zusätzlich oder alternativ zur qualitativen Bewertung angewendet werden. Die qualitative Bewertung kann eine erste schnelle Bewertung ermöglichen und die quantitative Bewertung kann abhängig von dem Ergebnis der qualitativen Bewertung erfolgen oder nicht. Wenn beispielsweise durch die qualitative Bewertung ermittelt wird, dass der Elektromotor in Bezug auf NVH nicht ordnungsgemäß ist, kann die quantitative Bewertung durchgeführt werden, um eine detailliertere Bewertung des

NVH-Verhaltens und damit ein detaillierteres Bewertungsergebnis zu erhalten. Bei der quantitativen Bewertung werden unterschiedliche Schallgrenzwerte vorgegeben, die dann unterschiedlichen NVH-Bewertungen zugeordnet werden. Beispielsweise kann das Bewertungsergebnis bei quantitativer Bewertung dann sein, dass der Elektromotor „sehr laut“ bei Überschreiten eines ersten Schallgrenzwerts, „laut“ bei Überschreiten eines zweiten Schallgrenzwerts und Unterschreiten des ersten Schallgrenzwerts, „leise“ bei Überschreiten eines dritten Schallgrenzwerts und Unterschreiten des zweiten Schallgrenzwerts oder „sehr leise“ bei Unterschreiten des dritten Schallgrenzwerts ist. Auch kann eine noch feingliedrigere Unterteilung der Bewertungsergebnisse anhand der für die quantitative Bewertung vorgegebenen Schallgrenzwerte erfolgen. Insbesondere kann für diese quantitative Bewertung die Anzahl von Überschreitungen des zumindest einen vorgegebenen Schallgrenzwerts durch die Schallwerte des Schallwert-Datensatzes berücksichtigt werden, insbesondere wie sie oben beispielhaft erläutert worden ist. So können für die quantitative Bewertung die mehreren Schallgrenzwerte in Kombination mit der Anzahl von Überschreitungen der Schallgrenzwerte durch die Schallwerte des Schallwert-Datensatzes berücksichtigt werden.

Weiterhin ist vorteilhaft, wenn der Elektromotor im Simulationsmodell modifiziert wird, wenn die Schallwerte den zumindest einen Schallgrenzwert überschreiten. Bei zusätzlicher Berücksichtigung der Anzahl von Überschreitungen kann die Modifikation erfolgen, wenn auch die durch den weiteren Grenzwert vorgegebene Anzahl an Überschreitungen überschritten wird. Mit anderen Worten kann das Simulationsmodell des Elektromotors modifiziert werden, wenn die Schallwerte den zumindest einen Schallgrenzwert so oft überschreiten, wie durch den oben erwähnten weiteren Grenzwert festgelegt wird. Durch die Modifikation kann der Elektromotor in konstruktiver Hinsicht im Simulationsmodell so verändert werden, dass das NVH-Verhalten nach Möglichkeit reduziert wird. Dabei können beispielsweise Modifikationen in der Dimensionierung, den Geometrien, den Materialien usw. einzelner Bauteile des Elektromotors, wie beispielsweise Lagern, erfolgen. Im Anschluss kann eine weitere Bewertung durchgeführt werden, um anhand der Bewertung zu überprüfen, ob mit dem modifizierten Simulationsmodell des Elektromotors ein verbessertes NVH-Verhalten erzielt wird.

Bevorzugt werden über eine Höhe oder, mit anderen Worten, ein Maß der Überschreitung der Schallgrenzwerte durch die Schallwerte, die Raumordnungen

dieser Schallwerte und/oder die Frequenzen dieser Schallwerte lokale Bereiche und/oder Umfänge der Modifikation des Simulationsmodells des Elektromotors bestimmt. Mit lokalen Bereichen können dabei einzelne Bereiche von Bauteilen oder Bauteile an sich gemeint sein. Mit dem Umfang einer Modifikation, also beispielsweise Geometrie- oder Größenanpassungen, ist dabei der Grad der Änderung gemeint, die der jeweilige lokale Bereich des Elektromotors in dem Simulationsmodell erfährt. So kann mittels der Bewertung nicht nur bestimmt werden, ob eine Änderung des Elektromotors in konstruktiver Hinsicht erfolgen soll, um das NVH-Verhalten zu verbessern, sondern auch, wo und wie dies geschehen soll. Für die einzelnen Modifikationen kann dabei ein vordefiniertes Set an Modifikationsmöglichkeiten vorliegen, deren Anwendung am Simulationsmodell konstruktive Stellschrauben zur Veränderung des NVH-Verhaltens des Elektromotors nutzt.

Vorzugsweise basiert das Simulationsmodell auf einem CAD-Modell (Abk. CAD steht für computer-aided design, zu Deutsch rechnerunterstütztes Konstruieren). Mittels eines CAD-Modells oder CAD-Konstruktionsmodells ist ein einfaches rechnerunterstütztes Erzeugen eines geometrischen Modells des Elektromotors mitsamt seinen Bauteilen möglich. An diesem Modell werden die Verformungen gemäß den Raumordnungen durchgeführt, also simuliert, sodass vorliegend beim Modell von einem Simulationsmodell gesprochen wird. Ebenso ist es mit dem CAD-Modell einfach möglich, die Geometrie und Dimensionierung der Bauteile des Elektromotors zu verändern, um diesen auf Basis des Ergebnisses der Bewertung in Richtung geringerer hör- und/oder spürbarer Schwingungen zu entwickeln.

Vorteilhaft ist ferner, wenn Betriebspunkte eines Betriebskennfelds des Elektromotors modifiziert werden, wenn die Schallwerte den zumindest einen Schallgrenzwert überschreiten. Diese Art der NVH-Optimierung am Betriebskennfeld kann alternativ oder zusätzlich zu konstruktiven Änderungen am Elektromotor stattfinden. Auch für die Modifikation des Betriebskennfelds kann eine Höhe der Überschreitung der Schallgrenzwerte durch die Schallwerte, die Raumordnungen dieser Schallwerte und/oder die Frequenzen dieser Schallwerte zur Bestimmung der zu modifizierenden Betriebspunkte in dem Betriebskennfeld herangezogen werden. Zudem kann bei zusätzlicher Berücksichtigung der Anzahl von Überschreitungen die Modifikation der Betriebspunkte erfolgen, wenn auch die durch den weiteren Grenzwert vorgegebene Anzahl an Überschreitungen überschritten wird. Als

Betriebskennfeld eines Elektromotors wird hierin eine Mehrheit von Betriebspunkten oder eine Gesamtheit aller Betriebspunkte des Elektromotors verstanden. Die Betriebspunkte können dabei in beliebiger Form von dem Betriebskennfeld organisiert sein, beispielsweise in einer Tabelle, in Form einer oder mehrerer Funktionen, in Form von zwei- oder dreidimensionalen Diagrammen, einer beliebigen Kombination der vorgenannten oder dergleichen. Die Betriebspunkte werden dabei insbesondere durch das Drehmoment und die Drehzahl definiert. Das Betriebskennfeld ist insbesondere in bekannter Weise zweidimensional darstellbar, wobei die Betriebspunkte des Elektromotors das Betriebskennfeld über die auf Achsen abgetragenen Drehmomente und Drehzahlen des Elektromotors aufspannen.

Vorteilhafterweise können dabei Betriebspunkte des Betriebskennfelds auf Basis von Kraftkennfeldern zum Reduzieren der hör- und/oder spürbaren Schwingungen verändert werden, wobei die Kraftkennfelder im Betrieb des Elektromotors an dem Elektromotor auftretende Kräfte für unterschiedliche Betriebsparameter des Elektromotors umfassen. Als Kraftkennfelder des Elektromotors werden insbesondere eine Mehrheit oder Gesamtheit von im Betrieb des Elektromotors an dem Rotor und/oder Stator des Elektromotors auftretenden Kräften in Abhängigkeit von den durchlaufenen Betriebspunkten des Betriebskennfelds des Elektromotors oder Betriebsparametern verstanden. In den Kraftkennfeldern können die Kräfte in Form von Kraftpunkten oder Kraftkenndaten gespeichert sein. Die Kraftpunkte können dabei in beliebiger Form von dem Kraftkennfeld organisiert sein, beispielsweise in einer Tabelle, in Form einer oder mehrerer Funktionen, in Form von zwei- oder dreidimensionalen Diagrammen, einer beliebigen Kombination der vorgenannten oder dergleichen. Die Kraftpunkte können dabei beispielsweise durch eine Angabe der an dem Rotor und/oder Stator auftretenden Kraft in Newton über einem oder mehreren Betriebsparametern des Elektromotors, beispielsweise einer Stromstärke, einer Spannung, einem Phasenwinkel, insbesondere Winkel von Rotor zu Stator des Elektromotors, usw., definiert sein. Möglich ist zudem, dass das Verfahren ferner das Erzeugen der Kraftkennfelder auf Basis des Simulationsmodells des Elektromotors aufweist. Dadurch, dass ein Simulationsmodell zum Einsatz kommt, können die Kraftkennfelder zerstörungsfrei, schnell und präzise ermittelt werden, statt eine reale Messung im Kraftfahrzeug durchzuführen. Dabei kann das Erzeugen des Kraftkennfelds beispielsweise auf Basis einer Finite Elemente Methode (FEM) Analyse erfolgen.

Außerdem kann dabei ein für den Elektromotor spezifischer Kraftkennfeld-Datensatz erzeugt werden, aus dem die Kraftkennfelder stammen und durch welchen den Kraftkennfeldern die Raumordnungen und Frequenzen des Elektromotors zuordenbar sind. Der spezifische Kraftkennfeld-Datensatz kann dabei statt den Kraftkennfelder direkt die Frequenzen zuzuordnen auch Zeitordnungen des Elektromotors zuordnen. Als Zeitordnungen und Raumordnungen werden hierin insbesondere dimensionslose Größen des Elektromotors verstanden, die im Betrieb auftreten. Die Zeitordnungen können aus den Frequenzen, insbesondere Anregungsfrequenzen, des Elektromotors abgeleitet sein. Die Zeitordnungen können dimensionslose Verhältnisse zwischen einer Anregungsfrequenz des Elektromotors oder des zumindest einen Bauteils, insbesondere Stators, des Elektromotors und einer vorgegebenen Referenzfrequenz, insbesondere einer Anzahl von Rotorumdrehungen, insbesondere des Rotors des Elektromotors, pro Sekunde oder, mit anderen Worten, einer Drehzahl, angeben. Damit kann der Elektromotor hinsichtlich der Frequenz und der Verformung infolge der Krafteinwirkungen auf diesen und damit in Bezug auf die hör- und/oder spürbaren Schwingungen durch die Zeit- und Raumordnungen charakterisiert werden, wodurch auch die Kraftkennfelder über die Zeit- und Raumordnungen in dem Kraftkennfeld-Datensatz korreliert werden können. Dabei besteht vorzugsweise eine vorgegebene Anzahl von Zeitordnungen und Raumordnungen, sodass quasi der gesamte (relevante) Betriebsbereich des Elektromotors mit den Zeitordnungen und Raumordnungen abgedeckt wird und in zeitlicher und räumlicher Hinsicht zugeordnet werden kann.

Die jeweiligen Parameter wie Raumordnungen, Zeitordnungen, Kraftkennfelder, Schallwerte usw. in dem Schallwert-Datensatz und in dem Kraftkennfeld-Datensatz können in beliebiger Form organisiert sein, beispielsweise in einer Tabelle, in Form einer oder mehrerer Funktionen, in Form von zwei- oder dreidimensionalen Diagrammen, einer beliebigen Kombination der vorgenannten oder dergleichen. So kann beispielsweise der Kraftkennfeld-Datensatz durch eine zweidimensionale graphische Repräsentation bzw. einen Plot abgespeichert oder abbildbar sein, bei dem die Zeitordnungen und Raumordnungen auf jeweiligen Koordinatenachsen abgetragen sind und diesen durch jeweilige Kraftkennfeldpunkte jeweils Kraftkennfelder zugeordnet sind, die wiederum mit ihren Informationen in einer weiteren zweidimensionalen graphischen Repräsentation abgespeichert oder abbildbar sein können.

Bei der Modifikation der Betriebspunkte des Betriebskennfelds des Elektromotors ist bevorzugt, diese in zumindest einem Teilbetriebsbereich des Betriebskennfelds auf Basis der ausgewählten Kraftkennfelder zum Reduzieren der hör- und/oder spürbaren Schwingungen in dem zumindest einen Teilbetriebsbereich auszuführen. Mit dem Betriebskennfeld ist damit ein Ausgangs-Betriebskennfeld gemeint, welches als Ausgangspunkt für eine Optimierung dient. Mit anderen Worten ist das (Ausgangs-)Betriebskennfeld dasjenige Betriebskennfeld, welches durch das Verfahren optimiert wird. Ein optimiertes Betriebskennfeld ist das Ergebnis eines solchen Verfahrens, also das durch das Verfahren optimierte (Ausgangs-)Betriebskennfeld. Das optimierte Betriebskennfeld ist dabei gegenüber dem (Ausgangs-)Betriebskennfeld zumindest teilweise in Richtung reduzierter hör- und/oder spürbarer Schwingungen des elektrischen Antriebssystems des Kraftfahrzeugs optimiert. Dabei wird sich zu Nutze gemacht, dass die Kraftkennfelder durch die Charakterisierung der auftretenden Kräfte über den Betriebspunkten Aufschluss über die hör- und/oder spürbaren Schwingungen an den Betriebspunkten geben. Mit anderen Worten korrelieren die auftretenden und anhand der Kraftkennfelder bekannten Kräfte zumindest teilweise mit den hör- und/oder spürbaren Schwingungen bei den jeweiligen Betriebspunkten. Dadurch kann das Verändern der Betriebspunkte des (Ausgangs-)Betriebskennfelds in zumindest einem Teilbetriebsbereich, insbesondere einem in Bezug auf die ermittelten Daten von hör- und/oder spürbaren Schwingungen besonders kritischen bzw. den Fahrkomfort einschränkenden Bereich, des (Ausgangs-)Betriebskennfelds auf Basis der bereitgestellten Kraftkennfelder zum Reduzieren der hör- und/oder spürbaren Schwingungen in dem zumindest einen Teilbetriebsbereich erfolgen.

Die Optimierung, also NVH-Reduzierung, kann dabei unter der Bedingung ausgeführt werden, dass ein Drehmoment und eine Drehzahl des Elektromotors von dem (Ausgangs-)Betriebskennfeld beibehalten werden. So kann sichergestellt werden, dass das (Ausgangs-)Betriebskennfeld nur in einem bestimmten, insbesondere vorteilhaften Parameterbereich im Hinblick auf eine mögliche vorherige Optimierung auf maximale Effizienz verändert wird. So kann das (Ausgangs-)Betriebskennfeld außerhalb des zumindest einen Teilbetriebsbereichs auf eine maximale Effizienz des Elektromotors voroptimiert sein oder werden. Damit wird also eine lokale NVH-Optimierung durchgeführt, bei der das (Ausgangs-)Betriebskennfeld, welches bereits auf eine maximale Effizienz voroptimiert sein kann oder anschließend noch optimiert werden kann, nur in einem bestimmten, den

Fahrkomfort einschränkenden NVH-Bereich optimiert wird. So kann gewährleistet werden, dass ein hoher Fahrkomfort bei über den gesamten Fahrzyklus gerechnet dennoch geringem Energieverbrauch erzielt wird. Für die NVH-Reduzierung kann ansonsten zumindest ein Betriebsparameter oder können mehrere Betriebsparameter des Elektromotors verändert werden. Dabei kann der zumindest eine Betriebsparameter eine Spannung und/oder eine Stromstärke des Elektromotors sein. Währenddessen können mögliche Bedingungen eingehalten werden, beispielsweise eine zulässige maximale Spannung und Stromstärke.

Eine Reduktion der hör- und/oder spürbaren Schwingungen in dem zumindest einen Teilbetriebsbereich kann dabei mit einem Effizienzverlust in dem zumindest einen Teilbetriebsbereich einhergehen. Das bedeutet, dass die Optimierung des Betriebskennfelds in Richtung reduzierter hör- und/oder spürbarer Schwingungen nicht gänzlich ohne Nachteil durchgeführt wird, auch wenn dieser durch die zuvor ermittelten Daten von hör- und/oder spürbaren Schwingungen geringer ausfällt und in dem optimierten Betriebskennfeld an den veränderten Betriebspunkten mit einer gegenüber dem (Ausgangs-)Betriebskennfeld reduzierten Effizienz einhergeht. Entsprechend können die Betriebspunkte also durch Veränderung von Betriebsparametern des Elektromotors an den Betriebspunkten zu Ungunsten der Effizienz, damit jedoch zu Gunsten von geringeren Schwingungen manipuliert werden.

Grundsätzlich kann das (Ausgangs-)Betriebskennfeld auch im gesamten Betriebsbereich des Elektromotors optimiert werden. Es kann aber vorteilhaft sein, das Betriebskennfeld des Elektromotors nur in einem bestimmten Betriebsbereich zu optimieren. Eine derartige lokale Optimierung kann eingesetzt werden, um bestimmte Betriebsbereiche auszusparen, in denen beispielsweise in eine andere Richtung als NVH-Reduzierung, zum Beispiel zur Effizienzmaximierung des Elektromotors, optimiert werden kann.

Ebenfalls Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist ein System zum Bewerten eines Elektromotors eines elektrischen Antriebssystems eines Kraftfahrzeugs hinsichtlich seiner im Betrieb hör- und/oder spürbaren Schwingungen, wobei das System aufweist:

- ein Bereitstellungsmodul zum Bereitstellen, insbesondere Erzeugen, eines Simulationsmodells des Elektromotors,

- ein Erzeugungsmodul zum Erzeugen eines für den Elektromotor spezifischen und frequenz aufgelösten Schallwert-Datensatzes auf Basis des Simulationsmodells, wobei der Schallwert-Datensatz Schallwerte des Elektromotors unterschiedlichen Frequenzen und unterschiedlichen Raumordnungen des Elektromotors zuweist, wobei die Raumordnungen unterschiedliche Verformungen einer Kraftwelle angeben, die in einem Luftspalt zwischen einem Stator und einem Rotor des Elektromotors auftreten, und
- ein Bewertungsmodul zum Bewerten des Elektromotors hinsichtlich seiner im Betrieb hör- und/oder spürbaren Schwingungen durch einen Abgleich der Schallwerte des Schallwert-Datensatzes mit zumindest einem vorgegebenen Schallgrenzwert.

Damit bringt ein erfindungsgemäßes System die gleichen Vorteile mit sich, wie sie ausführlich mit Bezug auf das erfindungsgemäße Verfahren erläutert worden sind. Insbesondere kann das System zum Ausführen des erfindungsgemäßen Verfahrens eingerichtet bzw. ausgebildet sein.

Die Module können dabei beispielsweise jeweils durch einen separaten Computerprogrammcode oder gemeinsam durch einen gemeinsamen Computerprogrammcode und/oder durch separate oder gemeinsame Funktionseinheiten eines Computers implementiert sein. Möglich ist auch, dass einzelne Module in einem gemeinsamen Modul implementiert sind, so beispielsweise das Bereitstellungmodul und das Erzeugungsmodul. Das System kann insbesondere einen oder mehrere Computer umfassen oder durch den einen oder mehrere Computer gebildet sein, welcher oder welche die einzelnen Module aufweisen können.

Ebenfalls Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist ein Computerprogrammprodukt, umfassend Befehle, die bei der Ausführung des Programms durch einen Computer diesen veranlassen, das erfindungsgemäße Verfahren auszuführen.

Damit bringt ein erfindungsgemäßes Computerprogrammprodukt die gleichen Vorteile mit sich, wie sie ausführlich mit Bezug auf das erfindungsgemäße Verfahren erläutert worden sind.

Das Computerprogrammprodukt kann dabei ein Computerprogramm an sich oder ein Produkt, etwa ein computerlesbarer Datenspeicher, sein, auf dem ein Computerprogramm zur Ausführung des Verfahrens gespeichert sein kann.

Weitere Vorteile, Merkmale und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung, in der unter Bezugnahme auf die Zeichnungen Ausführungsbeispiele im Einzelnen beschreiben sind. Es zeigen schematisch:

- Fig. 1 ein elektrisch angetriebenes Kraftfahrzeug,
- Fig. 2 eine Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Systems bei der Ausführung eines erfindungsgemäßen Verfahrens, und
- Fig. 3 die Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens aus Fig. 2.

Identische oder funktionsgleiche Elemente sind in den Figuren 1 bis 3 jeweils mit demselben Bezugszeichen bezeichnet.

Figur 1 zeigt rein schematisch ein elektrisch angetriebenes Kraftfahrzeug 10 mit einem elektrischen Antriebssystem 11. Das elektrische Antriebssystem 11 weist einen Elektromotor 12 auf.

Neben der genannten Komponente, insbesondere elektrischen Antriebskomponente, in Form des Elektromotors 12 kann das elektrische Antriebssystem 11 selbstverständlich weitere Komponenten bzw. Bauteile, wie beispielsweise eine Traktionsbatterie, einen Wechselrichter, Leistungselektronik, Getriebe usw., aufweisen, die jedoch der Übersichtlichkeit halber nicht alle in der Fig. 1 gezeigt sind. In jeder Fig. 1 sind aber der Stator 13 und der Rotor 14 als Bauteile des Elektromotors 12 gezeigt.

Figur 2 zeigt schematisch ein System 20 in Form eines Computers mit einem Erzeugungsmodul 21, einem Bereitstellungsmodul 22 und einem Ermittlungsmodul 23, wobei das System 20 sich außerhalb des in Fig. 1 gezeigten Kraftfahrzeugs 10 befindet. Das System 20 dient der Ausführung des hierin erläuterten und in Fig. 3 schematisch gezeigten Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen Verfahrens 30.

In dem System 20 dient das Bereitstellungsmodul 21 dem im ersten Verfahrensschritt 31 des Verfahrens 30 der Fig. 3 erfolgenden Bereitstellen,

insbesondere Erzeugen, des Simulationsmodells 1 des Elektromotors 12. Das Simulationsmodell 1 kann dabei insbesondere als ein CAD-Modell ausgestaltet sein oder auf einem CAD-Modell basieren.

Das Bereitstellungsmodul 22 des Systems 20 dient dem im zweiten Verfahrensschritt 32 des Verfahrens 30 erfolgenden Erzeugen eines für den Elektromotor 12 spezifischen und frequenz aufgelösten Schallwert-Datensatzes 2, welches auf Basis des zuvor erzeugten Simulationsmodells 1 erfolgt. Wie anhand der Darstellung des Schallwert-Datensatzes 2 in der Fig. 2 zu erkennen ist, ordnet der Schallwert-Datensatz 2 unterschiedlichen Raumordnungen RO und Frequenzen f des Elektromotors 12 unterschiedliche Schallwerte SW des Stators 13 zu. Eine erste Achse trägt die Schallwerte SW ab, wobei die zweite Achse die Frequenzen f des Elektromotors 12 abträgt, die sich insoweit aber Zeitordnungen ZO eines später näher erläuterten Kraftkennfeld-Datensatzes 4 zuordnen lassen. Die einzelnen Raumordnungen RO sind damit als Verläufe über den Schallwert SW und die Frequenz f mit unterschiedlich gestrichelten Linien dargestellt. Genauso wie die Kraftkennfelder 5 in dem Kraftkennfeld-Datensatz 4 sind die Raumordnungen RO bzw. ihre Verläufe in dem Schallwert-Datensatz 2 usw. dabei in Fig. 2 rein schematisch und in einer rein beispielhaften Anzahl gezeigt.

Das Bewertungsmodul 23 bewertet nun im Rahmen eines dritten Verfahrensschritts 33 des Verfahrens 30 den Elektromotor 12 hinsichtlich seiner im Betrieb hör- und/oder spürbaren Schwingungen durch einen Abgleich der Schallwerte SW des Schallwert-Datensatzes 2 mit zumindest einem vorgegebenen Schallgrenzwert SGW.

Der Schallgrenzwert SGW ist dabei in Fig. 2 rein beispielhaft als ein einziger absoluter Schallgrenzwert SGW gezeigt, kann jedoch gleichsam auch als ein relativer Schallgrenzwert SGW ausgebildet sein, der einen relativen Grenzwert eines Schallwerts SW in Abhängigkeit von der Frequenz f angibt. Im Übrigen ist neben einer qualitativen Bewertung mit einem Schallgrenzwert SGW die Verwendung mehrerer Schallgrenzwerte SGW für eine quantitative Bewertung des Elektromotors 12 hinsichtlich seines NVH-Verhaltens möglich. Auch die Berücksichtigung einer Anzahl von Überschreitungen des Schallgrenzwerts SGW durch die Schallwerte SW des Schallwert-Datensatzes 2 im Rahmen der Bewertung ist möglich, um nicht nur eine absolute Überschreitung des Schallgrenzwerts SGW, sondern auch eine

Häufigkeit von Überschreitungen des Schallgrenzwerts SGW zu berücksichtigen und dadurch eine präzisere Bewertung des NVH-Verhaltens des Elektromotors 12 zu erlauben.

In einem vierten Verfahrensschritt 34 des Verfahrens 30 der Fig. 3 kann bei einer schlechten Bewertung des NVH-Verhaltens des Elektromotors 12 gemäß dem dritten Verfahrensschritt 33 eine NVH-Optimierung des Elektromotors 12 zur Verbesserung des schlechten NVH-Verhaltens erfolgen.

Die NVH-Optimierung kann beispielsweise durch eine Modifikation des Simulationsmodells 1 des Elektromotors 12 und damit der Konstruktion des Elektromotors 12 erfolgen. Möglich ist es aber auch, das von dem System 20 erzeugbare Betriebskennfeld 3 des Elektromotors 12 zu modifizieren. Dazu kann der vom System 20 erzeugbare Kraftkennfeld-Datensatz 4 genutzt werden, welcher Kraftkennfeldern 5 Raumordnungen RO und Frequenzen f des Elektromotors 12 zuordnet. Die Kraftkennfelder 5 geben dabei die am Stator 13 des Elektromotors 12 auftretenden Kräfte in Abhängigkeit von Betriebsparametern des Elektromotors 12 an. So lassen sich ausgehend von den Raumordnungen RO und den Frequenzen f , bei denen die Schallwerte SW auftreten, welche den Schallgrenzwert SGW überschreiten, jene Kräfte in den Kraftkennfeldern 5 und damit Betriebspunkte in dem Betriebskennfeld 3 erkennen, die geändert werden müssen, um das NVH-Verhalten zu optimieren.

Die voranstehenden Erläuterungen der Ausführungsformen beschreiben die vorliegende Erfindung ausschließlich im Rahmen von Beispielen.

Bezugszeichenliste

1	Simulationsmodell
2	Schallwert-Datensatz
3	Betriebskennfeld
4	Kraftkennfeld-Datensatz
5	Kraftkennfeld
10	Kraftfahrzeug
11	elektrisches Antriebssystem
12	Elektromotor
13	Stator
14	Rotor
20	System
21	Erzeugungsmodul
22	Bereitstellungsmodul
23	Ermittlungsmodul
30	Verfahren
31	erster Verfahrensschritt
32	zweiter Verfahrensschritt
33	dritter Verfahrensschritt
34	vierter Verfahrensschritt
RO	Raumordnung
ZO	Zeitordnung
SW	Schallwert
SGW	Schallgrenzwert
f	Frequenz

Patentansprüche

1. Verfahren (30) zum Bewerten eines Elektromotors (12) eines elektrischen Antriebssystems (11) eines Kraftfahrzeugs (10) hinsichtlich seiner im Betrieb hör- und/oder spürbaren Schwingungen, wobei das Verfahren (30) durch die folgenden Schritte **gekennzeichnet** ist:
 - (a) Bereitstellen eines Simulationsmodells (1) des Elektromotors (12),
 - (b) Erzeugen eines für den Elektromotor (12) spezifischen und frequenz aufgelösten Schallwert-Datensatzes (2) auf Basis des Simulationsmodells (1), wobei der Schallwert-Datensatz (2) Schallwerte (SW) des Elektromotors (12) unterschiedlichen Frequenzen (f) und unterschiedlichen Raumordnungen (RO) des Elektromotors (12) zuweist, wobei die Raumordnungen (RO) unterschiedliche Verformungen einer Kraftwelle angeben, die in einem Luftspalt zwischen einem Stator (13) und einem Rotor (14) des Elektromotors (12) auftreten, und
 - (c) Bewerten des Elektromotors (12) hinsichtlich seiner im Betrieb hör- und/oder spürbaren Schwingungen durch einen Abgleich der Schallwerte (SW) des Schallwert-Datensatzes (2) mit zumindest einem vorgegebenen Schallgrenzwert (SGW).
2. Verfahren (30) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der zumindest eine Schallgrenzwert (SGW) einen absoluten Grenzwert eines Schallwerts (SW) umfasst.
3. Verfahren (30) nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** der zumindest eine Schallgrenzwert (SGW) einen relativen Grenzwert eines Schallwerts (SW) in Abhängigkeit von der Frequenz (f) umfasst.
4. Verfahren (30) nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** für die Bewertung eine Anzahl von Überschreitungen des zumindest einen vorgegebenen Schallgrenzwerts (SGW) durch die Schallwerte (SW) des Schallwert-Datensatzes (2) berücksichtigt wird.

5. Verfahren (30) nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** anhand des Schallgrenzwerts (SGW) eine qualitative Bewertung des Elektromotors (12) durchgeführt wird.
6. Verfahren (30) nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** anhand mehrerer Schallgrenzwerte (SGW) eine quantitative Bewertung des Elektromotors (12) durchgeführt wird.
7. Verfahren (30) nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Simulationsmodell (1) des Elektromotors (12) modifiziert wird, wenn die Schallwerte (SW) den zumindest einen Schallgrenzwert (SGW) überschreiten.
8. Verfahren (30) nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** über eine Höhe der Überschreitung der Schallgrenzwerte (SGW) durch die Schallwerte (SW), die Raumordnungen (RO) dieser Schallwerte (SW) und/oder die Frequenzen (f) dieser Schallwerte (SW) lokale Bereiche und/oder Umfänge der Modifikation des Simulationsmodells (1) des Elektromotors (12) bestimmt werden.
9. Verfahren (30) nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Simulationsmodell (1) auf einem CAD-Modell des Elektromotors (12) basiert.
10. Verfahren (30) nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** Betriebspunkte eines Betriebskennfelds (3) des Elektromotors (12) modifiziert werden, wenn die Schallwerte (SW) den zumindest einen Schallgrenzwert (SGW) überschreiten.
11. Verfahren (30) nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** Betriebspunkte des Betriebskennfelds (3) auf Basis von Kraftkennfeldern (5) zum Reduzieren der hör- und/oder spürbaren Schwingungen verändert werden, wobei die Kraftkennfelder (5) im Betrieb des Elektromotors (12) an dem Elektromotor (12) auftretende Kräfte für unterschiedliche Betriebsparameter des Elektromotors (12) umfassen.
12. Verfahren (30) nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein für den Elektromotor (12) spezifischer Kraftkennfeld-Datensatz (4) erzeugt wird,

aus dem die Kraftkennfelder (5) stammen und durch welchen den Kraftkennfeldern (5) die Raumordnungen (RO) und Frequenzen (f) des Elektromotors (12) zuordenbar sind.

13. System (20) zum Bewerten eines Elektromotors (12) eines elektrischen Antriebssystems (11) eines Kraftfahrzeugs (10) hinsichtlich seiner im Betrieb hör- und/oder spürbaren Schwingungen, wobei das System (20) **gekennzeichnet** ist durch:
- ein Bereitstellungsmodul (21) zum Bereitstellen eines Simulationsmodells (1) des Elektromotors (12),
 - ein Erzeugungsmodul (22) zum Erzeugen eines für den Elektromotor (12) spezifischen und frequenz aufgelösten Schallwert-Datensatzes (2) auf Basis des Simulationsmodells (1), wobei der Schallwert-Datensatz (2) Schallwerte (SW) des Elektromotors (12) unterschiedlichen Frequenzen (f) und unterschiedlichen Raumordnungen (RO) des Elektromotors (12) zuweist, wobei die Raumordnungen (RO) unterschiedliche Verformungen einer Kraftwelle angeben, die in einem Luftspalt zwischen einem Stator (13) und einem Rotor (14) des Elektromotors (12) auftreten, und
 - ein Bewertungsmodul (23) zum Bewerten des Elektromotors (12) hinsichtlich seiner im Betrieb hör- und/oder spürbaren Schwingungen durch einen Abgleich der Schallwerte (SW) des Schallwert-Datensatzes (2) mit zumindest einem vorgegebenen Schallgrenzwert (SGW).
14. Computerprogrammprodukt, umfassend Befehle, die bei der Ausführung des Programms durch einen Computer diesen veranlassen, das Verfahren (30) nach einem der Ansprüche 1 bis 12 auszuführen.

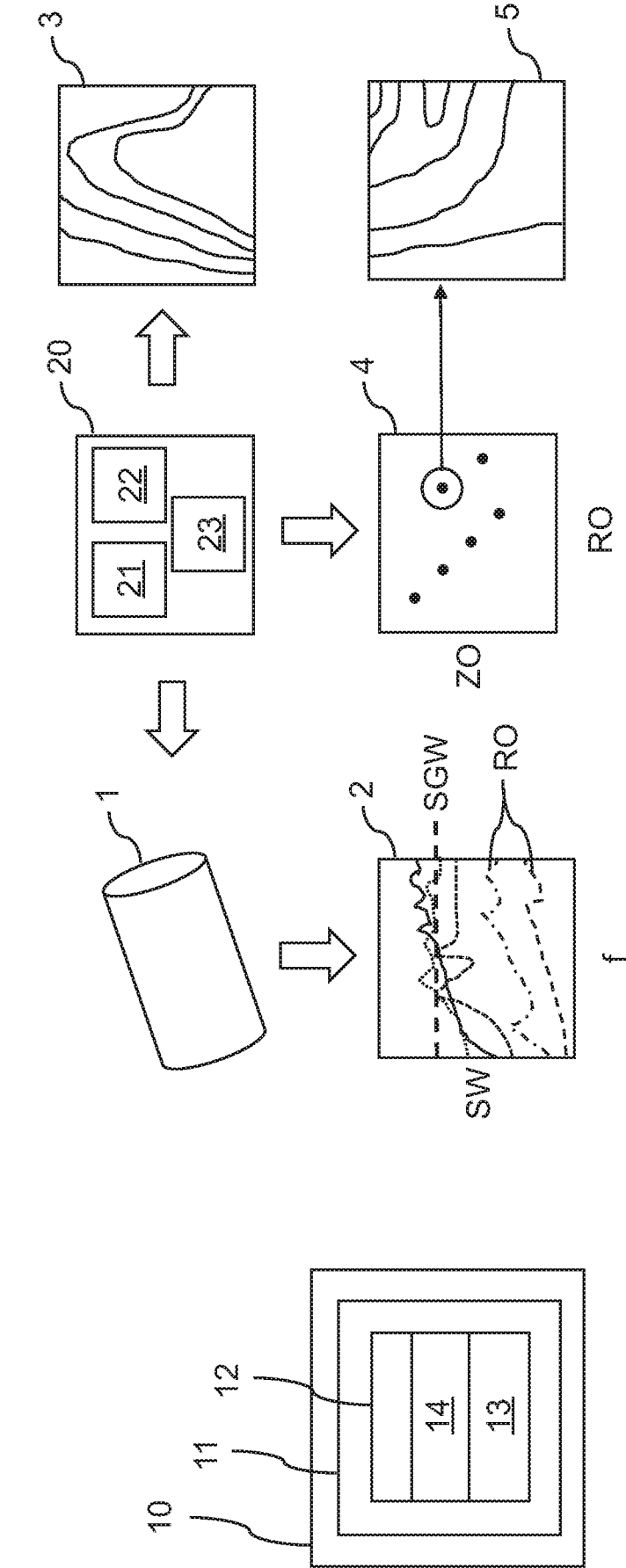


Fig. 1

Fig. 2

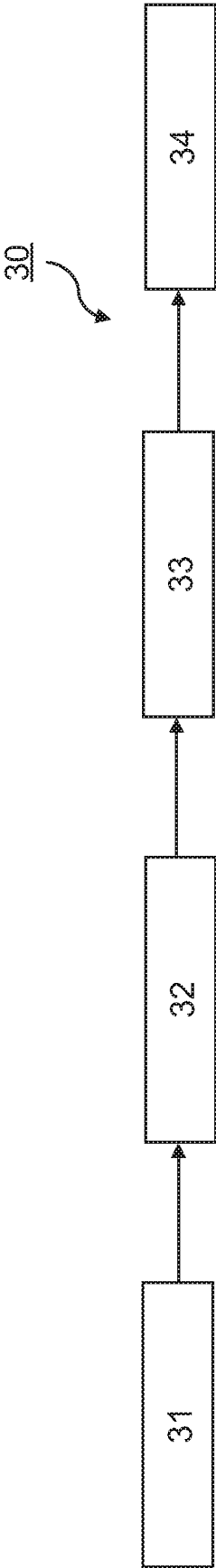


Fig. 3