



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2020 201 183.4**

(51) Int Cl.: **G06F 30/20 (2020.01)**

(22) Anmeldetag: **31.01.2020**

(43) Offenlegungstag: **05.08.2021**

(71) Anmelder:  
**Robert Bosch Gesellschaft mit beschränkter  
Haftung, 70469 Stuttgart, DE**

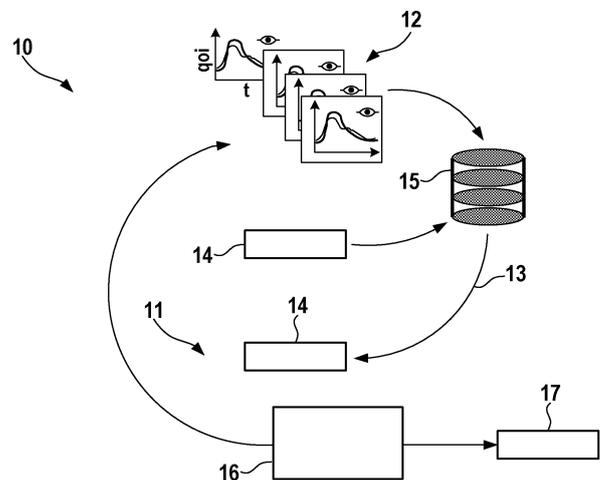
(72) Erfinder:  
**Rhode, Stephan, 76135 Karlsruhe, DE**

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.**

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur Simulation eines technischen Systems**

(57) Zusammenfassung: Verfahren (10) zur Simulation eines technischen Systems, gekennzeichnet durch folgende Merkmale:

- für einen beliebigen Anwendungsfall des Systems wird durch die Simulation eine Zeitreihe gewonnen,
- die Zeitreihe wird einer Augenscheinvalidierung (12) unterzogen,
- anhand der Augenscheinvalidierung (12) werden Parameter (13) einer vorgegebenen Validierungsmetrik (14) optimiert,
- die optimierten Parameter (13) werden in einer Datenbank (15) abgelegt,
- in weiteren Anwendungsfällen (11) werden die Parameter (13) aus der Datenbank (15) abgerufen und fallweise einer Validierung der jeweiligen Zeitreihe gemäß der Validierungsmetrik (14) zugrunde gelegt und
- bei Misslingen der Validierung wird die Simulation verbessert oder werden Ergebnisse der Simulation verworfen.



## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Simulation eines technischen Systems. Die vorliegende Erfindung betrifft darüber hinaus eine entsprechende Vorrichtung, ein entsprechendes Computerprogramm sowie ein entsprechendes Speichermedium.

### Stand der Technik

**[0002]** Als Gütekriterium für Modelle, Mess- und Testverfahren wird neben der Reliabilität und Objektivität insbesondere die Validität herangezogen. Im Zusammenhang mit Modellen zur Simulation technischer Prozesse bildet die Validierung hierbei einen Teilprozess innerhalb der Modellbildung. Gegenstand dieser Validierung ist die Beantwortung der im Rahmen der Qualitätssicherung zentralen Frage, ob eine Simulation für ihren Anwendungszweck geeignet ist. Erst durch den Validierungsprozess wird der notwendige Qualitätsnachweis erbracht, dass die Simulationsergebnisse die Realität widerspiegeln bzw. für den Anwendungszweck geeignet sind und für weitere Produktentwicklungsstufen herangezogen werden können.

**[0003]** Die sogenannte operative Validierung dient in diesem Kontext der Qualitätsbewertung des ausführbaren Simulationsmodells und hat beispielsweise in der Fahrzeugtechnik höchste Praxisrelevanz, weil sie unmittelbar das Verhalten des virtuellen Fahrzeugs mit dem des realen Fahrzeugs vergleicht. Für ihre Durchführung ist es nicht notwendig, das konzeptionelle Modell, das der Simulation zugrunde liegt und sehr komplex sein kann, zu kennen. Da die operative Validierung auf einem experimentellen Vergleich von Simulations- und Messdaten basiert, ist sie auf unterschiedlichste Simulationsmodelle und -Werkzeuge anwendbar.

**[0004]** US7571089B2 offenbart ein Simulationsverfahren, bei welchem zur Bewertung des Simulationsmodells Konfidenzintervalle von Simulation und Messungen miteinander verglichen werden.

### Offenbarung der Erfindung

**[0005]** Dem vorgeschlagenen Ansatz liegt die Erkenntnis zugrunde, dass bekannte Ansätze zum Validieren von Zeitreihen methodisch entweder der Augenscheinvalidierung (face validation) oder Anwendung von Validierungsmetriken zugeordnet werden können. Erstere bezeichnet hierbei die Einschätzung der Modellgüte anhand von Zeitreihenplots durch menschliche Experten, deren Ergebnis zum Beispiel auf einer vereinbarten Skala angegeben werden kann. Dieser Ansatz ist jedoch schlecht skalierbar - bei vermehrtem Einsatz von Simulation müsste eine größere Zahl von Experten Zeitreihenplots interpretieren - und unterliegt naturgemäß subjektiven Einflüssen.

tieren - und unterliegt naturgemäß subjektiven Einflüssen.

**[0006]** Um die genannten Nachteile der Augenscheinvalidierung zu überwinden, werden Validierungsmetriken eingesetzt. Eine Validierungsmetrik ist ein mathematischer Operator, der zwei Zeitreihen auf einen Skalar abbildet, der mitunter ebenfalls als Validierungsmetrik bezeichnet wird. Als eine der einfachsten Metriken ist der mittlere quadratische Fehler

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2,$$

der jedoch immer mehr durch neuere Metriken ersetzt wird, die zwischen Phasen-, Magnituden- und Steigungsfehlern unterscheiden. Diese neueren Metriken ermitteln aus den einzelnen Fehleranteilen über eine gewichtete Summe die Validierungsmetrik, wobei die Wahl der Gewichte einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis hat, etwa gemäß der folgenden Vorschrift:

$$R = w_Z \cdot Z + w_P \cdot E_P + w_M \cdot E_M + w_S \cdot E_S$$

Formel 1

**[0007]** Hierbei gilt die Randbedingung

$$w_Z + w_P + w_M + w_S = 1, \quad \text{Formel 2}$$

wobei  $w_Z$  den Gewichtungsfaktor der Korridorbewertung (corridor score),  $w_P$  den Gewichtungsfaktor der Phasenbewertung (phase score),  $w_M$  den Gewichtungsfaktor der Größenordnungsbewertung (magnitude score) und  $w_S$  den Gewichtungsfaktor der Steigungsbewertung (slope score) bezeichnet.

**[0008]** Um derlei Gewichte zu bestimmen, werden beispielsweise einer Gruppe von Experten mehrere Plots zur Augenscheinvalidierung vorgelegt und die jeweilige Expertenmeinung hinsichtlich der Modellqualität auf einer numerischen Skala von 0 bis 10 erfasst. Anschließend wird eine Validierungsmetrik mit Phasen-, Magnituden- und Steigungsfehler auf den Datensatz angewendet, um durch lineare Regression die optimalen Gewichtungsfaktoren zu bestimmen. Schlussendlich werden die Streuungen von Expertenmeinung und Validierungsmetrik mit den optimierten Gewichtungsfaktoren verglichen.

**[0009]** Die Erfindung stellt ein Verfahren zur Simulation eines technischen Systems, eine entsprechende Vorrichtung, ein entsprechendes Computerprogramm sowie ein entsprechendes Speichermedium gemäß den unabhängigen Ansprüchen bereit.

**[0010]** Ein Grundgedanke des vorgeschlagenen Ansatzes liegt darin, die im Wege der Augenscheinva-

lidierung durchgeführte Parametrierung von Validierungsmetriken dahingehend zu erweitern, dass die resultierenden Datensätze in einer Datenbank erfasst werden. Diesem Ansatz liegt die Erkenntnis zugrunde, dass es für einen praktischen Einsatz wünschenswert erscheint, die einmal anhand eines beliebigen Anwendungsfalles (use case) optimierten Gewichtungsfaktoren unter Nutzung einer Datenbank langfristig zugänglich zu machen. Eine solche Datenbank kann anhand der Merkmale der von ihr abgedeckten Anwendungsfälle geclustert werden. Falls das Konfidenzintervall aus der Validierungsmetrik zu groß wird und somit auf das Vorliegen eines neuen Anwendungsfalles hindeutet, kann eine erneute Augenscheininvalidierung angezeigt sein.

**[0011]** Ein Vorzug dieser Lösung liegt in der eröffneten Möglichkeit, die Optimierung von Gewichtungsfaktoren einer Validierungsmetrik ins Produktlebenszyklusmanagement (product lifecycle management, PLM) zu integrieren. Dies wiederum gestattet die Speicherung und den Austausch von Expertenwissen ebenso wie dessen Übertragung auf neue Anwendungsfälle.

**[0012]** Durch die in den abhängigen Ansprüchen aufgeführten Maßnahmen sind vorteilhafte Weiterbildungen und Verbesserungen des im unabhängigen Anspruch angegebenen Grundgedankens möglich.

#### Figurenliste

**[0013]** Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in den Zeichnungen dargestellt und in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigt:

**Fig. 1** das Flussdiagramm eines Verfahrens gemäß einer ersten Ausführungsform.

**Fig. 2** schematisch eine Arbeitsstation gemäß einer zweiten Ausführungsform.

#### Ausführungsformen der Erfindung

**[0014]** Der Ablauf eines erfindungsgemäßen Verfahrens (10) ist in **Fig. 1** dargestellt. Zunächst wird für einen beliebigen Anwendungsfall des modellierten Systems im Wege der Simulation und Messung jeweils eine Zeitreihe gewonnen und durch mehrere Experten einer Augenscheininvalidierung (12) unterzogen, anhand derer die Parameter (13) einer vorgegebenen Validierungsmetrik (14) optimiert werden.

**[0015]** Für die Wahl der Validierungsmetrik (14) sowie die Art der Optimierung bieten sich verschiedene Methoden an. Beispielsweise mag eine solche Metrik - wie im obigen Beispiel - als gewichtete Summe definiert sein, deren Gewichte durch die Parameter (13) gebildet werden.

**[0016]** Die auf diesem Wege ermittelte Expertenmeinung und die optimierten Gewichtungsfaktoren werden gemeinsam mit bestimmten Merkmalen des betreffenden Anwendungsfalles in einer Datenbank (15) gespeichert. Bei Vorliegen einer hinreichenden Anzahl an Datensätzen lässt sich anhand dieser Merkmale durch Ballungsanalyse (clustering) eine Einteilung der Anwendungsfälle in unterschiedliche sogenannte Cluster vornehmen.

**[0017]** In jedem weiteren Anwendungsfall (11) wird zuerst dessen Ähnlichkeit zu bereits bekannten Anwendungsfällen geprüft und ggf. deren Cluster ermittelt; die entsprechenden Parameter (13) werden aus der Datenbank (15) abgerufen und definieren die auf den vorliegenden Fall übertragbare Validierungsmetrik (14). Falls deren Konfidenzintervall eine vorgegebene Intervalllänge überschreitet (Entscheidung 16), werden die Augenscheininvalidierung (12) und das Optimieren der Parameter (13) wiederholt, um die Datenbank (15) anhand des Ergebnisses zu aktualisieren und das darin enthaltene Expertenwissen somit kontinuierlich zu erweitern; mit der Zeit lässt sich die Anzahl der für eine Augenscheininvalidierung (12) erforderlichen Schritte entsprechend verringern. Hält das Konfidenzintervall hingegen die Maximallänge ein, so kann die abgerufene Validierungsmetrik auch im betrachteten Fall (11) unmittelbar zur Anwendung gelangen (17).

**[0018]** Dieses Verfahren (10) kann beispielsweise in Software oder Hardware oder in einer Mischform aus Software und Hardware beispielsweise in einer Arbeitsstation (20) implementiert sein, wie die schematische Darstellung der **Fig. 2** verdeutlicht.

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**Zitierte Patentliteratur**

- US 7571089 B2 [0004]

### Patentansprüche

1. Verfahren (10) zur Simulation eines technischen Systems anhand eines Modelles des Systems, **gekennzeichnet durch** folgende Merkmale:

- für einen beliebigen Anwendungsfall des Systems wird durch die Simulation eine Zeitreihe gewonnen,
- die Zeitreihe wird einer Augenscheinvalidierung (12) unterzogen,
- anhand der Augenscheinvalidierung (12) werden Parameter (13) einer vorgegebenen Validierungsmetrik (14) optimiert,
- die optimierten Parameter (13) werden in einer Datenbank (15) abgelegt,
- in weiteren Anwendungsfällen (11) werden die Parameter (13) aus der Datenbank (15) abgerufen und fallweise einer Validierung der jeweiligen Zeitreihe gemäß der Validierungsmetrik (14) zugrunde gelegt und
- bei Misslingen der Validierung wird die Simulation verbessert oder werden Ergebnisse der Simulation verworfen.

2. Verfahren (10) nach Anspruch 1, **gekennzeichnet durch** mindestens eines der folgenden Merkmale:

- mithilfe der Simulation wird das technische System weiterentwickelt,
- mithilfe der Simulation wird das technische System verbessert oder
- mithilfe der Simulation werden Fehler des technischen Systems identifiziert.

3. Verfahren (10) nach Anspruch 1 oder 2, **gekennzeichnet durch** folgendes Merkmal:

- ein Produktlebenszyklus des Systems wird mittels der Datenbank (15) verwaltet.

4. Verfahren (10) nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **gekennzeichnet durch** folgende Merkmale:

- gemeinsam mit den Parametern (13) werden Merkmale des Anwendungsfalles in der Datenbank (15) abgelegt,
- anhand der Merkmale wird eine Einteilung der Anwendungsfälle (11) in unterschiedliche Cluster vorgenommen und
- das Abrufen der Parameter (13) erfolgt gemäß der Einteilung.

5. Verfahren (10) nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **gekennzeichnet durch** folgende Merkmale:

- die Validierungsmetrik (14) liefert ein Konfidenzintervall für ein vorgegebenes Konfidenzniveau und
- falls in einem der weiteren Anwendungsfälle (11) das Konfidenzintervall eine vorgegebene Intervalllänge überschreitet, werden die Augenscheinvalidierung (12) und das Optimieren der Parameter (13) wiederholt.

6. Verfahren (10) nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **gekennzeichnet durch** folgende Merkmale:

- die Validierungsmetrik (14) ist eine gewichtete Summe von Summanden und
- die Parameter (13) sind Gewichte der Summanden.

7. Verfahren (10) nach Anspruch 6, **gekennzeichnet durch** mindestens eines der folgenden Merkmale:

- die Summanden umfassen eine Korridorbewertung der Zeitreihe,
- die Summanden umfassen eine Phasenbewertung der Zeitreihe,
- die Summanden umfassen eine Größenordnungsbewertung der Zeitreihe oder
- die Summanden umfassen eine Steigungsbewertung der Zeitreihe.

8. Computerprogramm, welches eingerichtet ist, das Verfahren (10) nach einem der Ansprüche 1 bis 7 auszuführen.

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

10. Vorrichtung (20), die eingerichtet ist, das Verfahren (10) nach einem der Ansprüche 1 bis 7 auszuführen.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

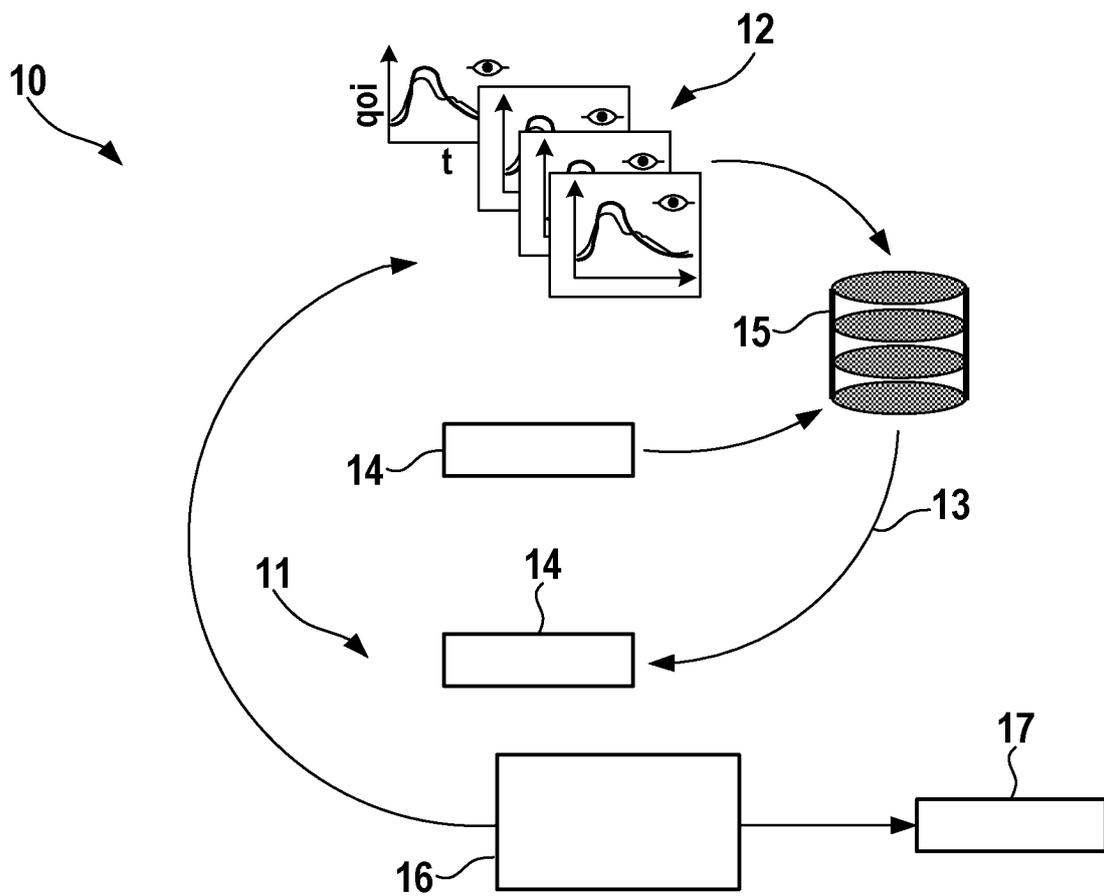


Fig. 1

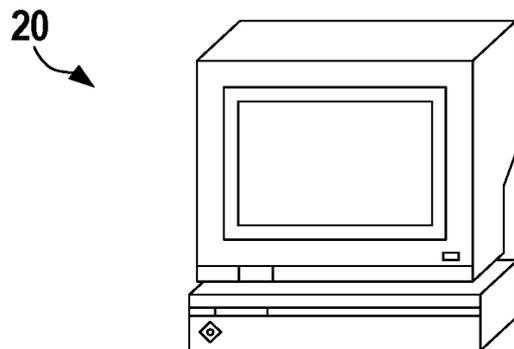


Fig. 2