

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2018/083147 A1

(71) Anmelder: AVL LIST GMBH [AT/AT]; Hans-List-Platz 1, 8020 Graz (AT).

(57) Zusammenfassung: Um eine Anregfrequenz für ein Diagnoseverfahren eines technischen Systems auf Basis der Anregung des technischen Systems mit einem Anregesignal mit der Anregfrequenz zu ermitteln ist vorgesehen, dass das technische System (1) als Volterra-Reihe mit Volterra- Kernel ($H_n(\omega_1, \dots, \omega_n)$) modelliert wird, im fehlerfreien Zustand des technischen Systems (1) ein Volterra-Kernel ($H_{n,nom}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) n-ter Ordnung für den fehlerfreien Zustand

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)
- vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eingehen (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe h)

ermittelt wird, für einen definierten Fehlerzustand des technischen Systems (1) ein Volterra-Kernel ($H_{n,\text{fault}}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) n-ter Ordnung für den fehlerbehafteten Zustand ermittelt wird, ein Bewertungskernel ($H_{n,\text{diff}}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) n-ter Ordnung als Funktion des Volterra-Kernels ($H_{n,\text{nom}}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) n-ter Ordnung für den fehlerfreien Zustand und des Volterra-Kernel ($H_{n,\text{fault}}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) n-ter Ordnung für den fehlerbehafteten Zustand ermittelt wird und der Bewertungskernel ($H_{n,\text{diff}}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) n-ter Ordnung ausgewertet wird, um einen Frequenzbereich zu bestimmen, in dem die Verstärkung des Bewertungskernels ($H_{n,\text{diff}}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) einen vorgegebenen Grenzwert übersteigt und die Anregefrequenz (ω_m) für das Anregesignal ($a(t)$) aus diesem Frequenzbereich gewählt wird.

Verfahren zur Diagnose eines technischen Systems

Die gegenständliche Erfindung betrifft ein Verfahren zur Diagnose eines technischen Systems, das ein Eingangssignal auf ein Ausgangssignal abbildet, wobei dem Eingangssignal im Betrieb des technischen Systems ein Anregesignal mit zumindest einer Anregfrequenz überlagert wird und zur Diagnose das Eingangssignal und/oder das Ausgangssignal analysiert wird, um einen Fehlerzustand des technischen System festzustellen.

Es gibt verschiedene bekannte Diagnoseverfahren zur Diagnose eines galvanischen Elements, insbesondere einer Brennstoffzelle. Einen guten Überblick über bekannte Verfahren kann aus Jinfeng Wu, et al., „Diagnostic tools in PEM fuel cell research: Part I Electrochemical techniques“, Int. Journal of Hydrogen Energy 33 (2008), S.1735-1746 entnommen werden. Ein sehr einfaches Verfahren ist die Messung der Polarisationskurve in Form eines statischen Zusammenhanges zwischen Strom und Spannung. Zur Ermittlung der Polarisationskurve wird der Strom in Abhängigkeit von einer sich ändernden Spannung, oder umgekehrt, gemessen. Polarisationskurven liefern Information über das allgemeine Verhalten von galvanischen Elementen bei bestimmten Betriebszuständen. Mit der Auswertung einer Polarisationskurve können allerdings nicht verschiedene, gleichzeitig auftretende Zustände analysiert werden, ebenso wenig wie dynamische Prozesse. Einzelne Fehlerzustände können jedoch dieselbe Wirkung auf die Polarisationskurve haben, sodass einzelne Fehlerzustände unter Umständen nicht unterschieden werden können. Um eine Fehlerunterscheidung zu vereinfachen oder überhaupt zu ermöglichen, können dynamische Effekte mitberücksichtigt werden. Ein wesentlicher Nachteil dieser Methode ist aber, dass die Analyse der Polarisationskurven zeitaufwendig ist und nicht im laufenden Betrieb des galvanischen Elements eingesetzt werden kann.

Eine andere oftmals verwendete Methode ist die Elektrochemische Impedanzspektroskopie, die es erlaubt das dynamische Verhalten des galvanischen Elements zu erfassen. Dazu wird dem galvanischen Element ein kleiner Wechselstrom oder eine kleine Wechselspannung mit bekannter Amplitude und Anregfrequenz (auch mehrere Anregfrequenzen) eingeprägt und die Antwort (in Amplitude und Phase) in Abhängigkeit von der Anregfrequenz gemessen und ausgewertet. Die Auswertung erfolgt durch Analyse der Grundwelle, bzw. der Grundwellen bei mehreren Anregfrequenzen. Mit der Elektrochemischen Impedanzspektroskopie können auch verschiedene Einflüsse auf den aktuellen Betriebszustand diagnostiziert werden und die Methode kann auch im Realbetrieb des galvanischen Elements eingesetzt werden.

Ein anderes bekanntes, als Total Harmonic Distortion Analysis (THDA) bezeichnetes, Verfahren baut auf der Elektrochemischen Impedanzspektroskopie auf und analysiert das Verhältnis der Grundschwingung zu deren Oberwellenanteilen. Dieses Verfahren ist in der EP 1

646 101 B1 oder in Ramschak E., at el., „Detection of fuel cell critical status by stack voltage analysis“, Journal of Power Source 157 (2006), S.837-840 beschrieben.

Sowohl die Elektrochemische Impedanzspektroskopie als auch THDA beruhen allerdings darauf, dass die Anregfrequenz vorab bekannt ist, mit der ein bestimmter Zustand des galvanischen Elements bestmöglich angeregt werden kann, um eine aussagekräftige Diagnose zu ermöglichen. Das „gesunde“, d.h. fehlerfreie, galvanische Element liefert eine andere Antwort auf ein Anregesignal, als ein galvanisches Element mit einem fehlerhaften Zustand. Das Anregesignal, insbesondere die Anregfrequenz, soll diesen Fehlerzustand besonders gut anregen, um den fehlerbehafteten Zustand diagnostizieren zu können. Im Wesentlichen bedeutet das, dass die Amplitude der Antwort des galvanischen Elements auf ein Anregesignal ausreichend hoch sein muss, um sicher messtechnisch erfasst und ausgewertet werden zu können. Das Problem hierbei ist jedoch, dass eine bestimmte Anregfrequenz nicht jeden Fehlerzustand gleichermaßen anregt. Damit ist es notwendig bestimmte Fehlerzustände mit verschiedenen Anregfrequenzen anzuregen. Allerdings sind diese optimalen Anregfrequenzen für ein bestimmtes galvanisches Element vorab nicht bekannt, sondern müssen bisher aufwendig empirisch ermittelt werden.

Die Verwendung eines breiten Anregfrequenzbandes löst diese Problematik nicht oder nur bedingt, da es, vor allem aufgrund des nichtlinearen Verhaltens des galvanischen Elements, zu Frequenzüberlagerungen und Intermodulationen kommt. Das kann dazu führen, dass die messtechnische erfasste Antwort des galvanischen Elements auf das Anregesignal nicht mehr oder nicht mehr eindeutig ausgewertet und einem bestimmten Fehlerzustand zugeordnet werden kann. Bei Verwendung mehrere Anregfrequenzen sollten diese daher so ausgewählt werden, dass sich die einzelnen Anregfrequenzen nicht gegenseitig beeinflussen, was bei einem ganzen Frequenzband nicht gegeben ist. Daraus folgt aber, dass zur Anregung an sich nur diskrete Anregfrequenzen geeignet sind und kein kontinuierliches Frequenzspektrum.

Die obigen Ausführungen können auch auf technische Systeme verallgemeinert werden, deren Funktion diagnostiziert werden soll, indem die Antwort des technischen Systems (Ausgangsgröße) auf eine bestimmte Anregung (Eingangsgröße) mit einer bestimmten Anregfrequenz ausgewertet wird. Als technisches System kommen hierbei insbesondere galvanische Elemente oder Elektrolyseure in Frage. Ein galvanisches Element ist beispielsweise eine Batterie, ein Akkumulator oder eine Brennstoffzelle. Eine Brennstoffzelle kann dabei beispielsweise eine Alkalische Brennstoffzelle (AFC), eine Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle (PEMFC), eine Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC), eine Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC), eine Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC) oder eine Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC) sein. Ein Elektrolyseur kann dabei beispielsweise ein Polymerelektrolyt-Elektrolyseur, ein Festoxid-Elektrolyseur oder ein Alkaline-Elektrolyseur sein.

Es ist daher eine Aufgabe der gegenständlichen Erfindung, eine Anregefrequenz für ein Diagnoseverfahren eines technischen Systems auf Basis der Anregung des technischen Systems mit einem Anregesignal mit der Anregefrequenz auf einfachere Weise zu ermitteln.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass das technische System als Volterra-Reihe mit Volterra-Kernel modelliert wird, im fehlerfreien Zustand des technischen Systems ein Volterra-Kernel n-ter Ordnung für den fehlerfreien Zustand ermittelt wird, für einen definierten Fehlerzustand des technischen Systems ein Volterra-Kernel n-ter Ordnung für den fehlerbehafteten Zustand ermittelt wird, aus dem Volterra-Kernel n-ter Ordnung für den fehlerfreien Zustand und dem Volterra-Kernel n-ter Ordnung für den fehlerbehafteten Zustand ein Differenzkernel n-ter Ordnung gebildet wird und der Differenzkernel n-ter Ordnung ausgewertet wird, um einen Frequenzbereich zu bestimmen, in dem die Verstärkung des Differenzkernels einen vorgegebenen Grenzwert übersteigt und die Anregefrequenz für das Anregesignal aus diesem Frequenzbereich gewählt wird. Diese Vorgehensweise erlaubt eine systematische, einfache Bestimmung der für einen bestimmten Fehlerzustand optimalen Anregefrequenzen des technischen Systems.

Vorzugsweise wird die Anregefrequenz für das Anregesignal ausgewählt wird, bei der die Verstärkung des Differenzkernels n-ter Ordnung einen Maximalwert annimmt. Auf diese Weise kann mit der bestmöglichen Anregung zur Diagnose gerechnet werden. Darüber hinaus lässt sich eine Maximalwertsuche auch einfach automatisieren, um die Anregefrequenzen vollständig automatisiert zu ermitteln.

Da eine direkte Schätzung der Volterra-Kernel aus Eingangs-/ Ausgangsdaten im Allgemeinen nicht möglich ist, wird vorzugsweise ein parametrisches Modell verwendet, beispielsweise ein nicht-lineares, polynomiales NARMAX oder NARX Modell, von dem die Volterra-Kernel analytisch abgeleitet werden können. Das parametrische Modell wird dabei vorzugsweise im Zeitbereich aus bekannten Daten geschätzt. Vom parametrischen Modell werden die Volterra Kernels bevorzugt mittels Harmonic Probing Algorithm analytisch abgeleitet.

Die gegenständliche Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Figuren 1 bis 6 näher erläutert, die beispielhaft, schematisch und nicht einschränkend vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung zeigen. Dabei zeigt

Fig.1 einen Volterra-Kernel 2.Ordnung des technischen System im fehlerfreien Zustand,

Fig.2 einen Volterra-Kernel 2.Ordnung des technischen System im fehlerbehafteten Zustand,

Fig.3 den sich daraus ergebenden Differenzkernel-Kernel 2.Ordnung,

Fig.4 eine Brennstoffzelle als Beispiel eines zu diagnostizierenden technischen Systems,

Fig.5 ein beispielhaftes APRBS Eingangssignal und

Fig.6 die Reaktion des technischen Systems darauf in Form des Ausgangssignals.

Die Erfindung beruht auf der Modellierung des nichtlinearen Übertragungsverhaltens eines technischen Systems, beispielsweise eines galvanischen Elements oder eines Elektrolyseurs. Das Übertragungsverhalten ist bekanntermaßen die Antwort (Ausgangssignal $y(t)$) des technischen Systems auf eine bestimmte Anregung (Eingangssignal $u(t)$). Bei einem galvanischen Element ist das Eingangssignal $u(t)$ beispielsweise ein elektrischer Strom I und das Ausgangssignal $y(t)$ eine sich einstellende elektrische Spannung U , oder umgekehrt. Ein technisches System hat jedoch oftmals ein (hochgradig) nichtlineares Eingangs-/Ausgangsverhalten. Solche nichtlinearen technischen System werden oftmals mittels einer bekannten Volterra-Reihe modelliert, in der Form $y(t) = y_1(t) + y_2(t) + \dots + y_n(t)$ mit der n -ten nichtlinearen

Teildynamik $y_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \dots, \tau_n) u(t - \tau_1) \cdot \dots \cdot u(t - \tau_n) d\tau_1 \dots d\tau_n$. Theoretisch reicht

n von 1 bis unendlich, praktisch ist für die allermeisten Anwendungen bzw. technischen Systeme $n < 5$ ausreichend. Beispielsweise kommt man bei einem galvanischen Element mit $n=3$ aus. Für ein lineares System ($n=1$) ergibt sich dann die bekannte Faltung für lineare, zeitin-

variante Systeme $y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) u(t - \tau) d\tau$, mit der Impulsantwort h . Die Funktionen $h_1, \dots, h_n$

sind die nichtlinearen Impulsantworten (im Zeitbereich) (h_1 ist die lineare Impulsantwort), die das nichtlineare System beschreiben und als Volterra-Kernel bezeichnet werden.

Der Ansatz über eine Volterra-Reihe hat den Vorteil, dass die Volterra-Reihe mit der multidimensionalen Fouriertransformation einfach in den Frequenzbereich transformiert werden kann. Das Übertragungsverhalten im Frequenzbereich ist durch die Übertragungsfunktionen $H_n(j\omega)$ gegeben und ergibt sich aus der multidimensionalen Fouriertransformation zu

$$H_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \dots, \tau_n) e^{-j(\omega_1\tau_1 + \dots + \omega_n\tau_n)} d\tau_1 \dots d\tau_n, \text{ was dem Volterra-Kernel } n\text{-ter}$$

Ordnung im Frequenzbereich entspricht. Für $n=1$ ist h_n die lineare Impulsantwort und H_n die lineare Übertragungsfunktion und entspricht dem Spektrum, das bei der Elektrochemischen Impedanzspektroskopie eines galvanischen Elements als technisches System ausgewertet wird. Mit der Fouriertransformierten der Eingangsfunktion $U(j\omega)$ ergibt sich die Ausgangs-

funktion $y(t)$ zu $y(t) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} H_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) \prod_{i=1}^n U(j\omega_i) e^{j(\omega_1 + \dots + \omega_n)t} d\omega_1 \dots d\omega_n$. Diese

Zusammenhänge sind aus dem Stand der Technik hinreichend bekannt, z.B. aus Kapitel 6 von Billings, S.A., „Nonlinear System Identification : NARMAX methods in the time, frequency, and spatio-temporal domains“, Wiley Verlag, 2013, ISBN 978-1-119-94359-4 oder

Shan-Jen Cheng, et al., „Nonlinear modeling and identification of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)“, Int. Journal of Hydrogen Energy 40 (2015), S.9452-9461.

Der Vorteil einer Volterra-Reihe ist die direkte Interpretierbarkeit der Volterra-Kernel. Mit einer beispielhaften Eingangsfunktion $u(t) = \cos(\omega_a t) + \cos(\omega_b t)$ ergibt sich beispielsweise

5 der Volterra-Kernel 2.Ordnung ($n=2$) aus $y_2(t) = \sum_{\omega_{1,2}=[\pm\omega_a, \pm\omega_b]}^{\text{alle Permutationen } \omega_{1,2}} H(\omega_1, \omega_2) e^{j(\omega_1 + \omega_2)t}$. Damit sind

im Frequenzspektrum enthalten:

$H(+\omega_a, +\omega_a) e^{j(\omega_a + \omega_a)t}$ als 2. Harmonische Frequenz bei $(\omega_a + \omega_a)$

$H(+\omega_a, -\omega_a) e^{j(\omega_a - \omega_a)t}$ als konstante Verstärkung

$H(+\omega_a, +\omega_b) e^{j(\omega_a + \omega_b)t}$ als Intermodulation der Frequenzen ω_a, ω_b

10 $H(+\omega_a, -\omega_b) e^{j(\omega_a - \omega_b)t}$ als Intermodulation der Frequenzen ω_a, ω_b

usw.

Beispielsweise kann man den Volterra-Kernel 2.Ordnung als Konturplot für die Verstärkung auf einer Frequenzebene ω_1, ω_2 darstellen, woraus sich direkt die nichtlinearen Zusammenhänge zwischen Eingang und Ausgang erkennen lassen. Auch das ist aus den oben genannten Kapitel 6 von Billings, S.A. oder aus Shan-Jen Cheng, et al. grundsätzlich bekannt.

Das Problem bei einer Volterra-Reihe als mathematisches Modell für ein gegebenes technisches System (beispielsweise ein galvanisches Element) ist jedoch, dass die Volterra-Kernel für das technische System in der Regel nicht oder nur sehr schwer direkt bestimmt oder aus bekannten Daten (beispielsweise am technischen System gemessenen Daten) identifiziert werden können.

Um dieses Problem zu beheben wurde bereits vorgeschlagen, das nichtlineare System im Zeitbereich mittels parametrischer Modelle zu beschreiben, die dann analytisch in den Frequenzbereich überführt werden können. Ein parametrisches Modell ist ein Modell, das den aktuellen Systemausgang aus den mit Parametern gewichteten vergangenen Ein- und Ausgängen ermittelt. Das parametrische Modell liegt zur Identifikation und Strukturerkennung in einer „linear-in-den-Parametern“ Form vor, wobei die vergangenen Ein- und Ausgänge jedoch nichtlinear miteinander kombiniert werden können, z.B. in der Form $y(t) = \theta_1 y(k-1) y(k-2) + \theta_1 u(k-1) y(k-1) + \dots$, mit den Parametern θ . Auch das wurde bereits ausführlich in der zitierten Literatur, also beispielsweise Kapitel 2 und 3 von Billings, S.A. oder Shan-Jen Cheng, beschrieben und kann daher als bekannt vorausgesetzt werden. Dieses bekannte Vorgehen wird zum besseren Verständnis trotzdem nachfolgend kurz erläutert.

Das System wird mit einem polynomialen NARMAX Modell, als Beispiel eines parametrischen Modells, modelliert, in der Form

$$y(k) = \theta_0 + \sum_{i_1=1}^j \theta_{i_1} x_{i_1}(k) + \sum_{i_1=1}^j \sum_{i_2=1}^j \theta_{i_1 i_2} x_{i_1}(k) x_{i_2}(k) + \dots + \sum_{i_1=1}^j \dots \sum_{i_\ell=1}^j \theta_{i_1 i_2 \dots i_\ell} x_{i_1}(k) x_{i_2}(k) \dots x_{i_\ell}(k) + e(k)$$

- 5 Werden die Störungen $e(k)$ weggelassen, spricht man auch von einem NARX Modell. Mit den Modellparametern $\theta_{i_1 i_2 \dots i_\ell}$, $j = j_y + j_u + j_e$ und

$$x_m(k) = \begin{cases} y(k-m) & 1 \leq m \leq j_y \\ u(k-(m-j_y)) & j_y + 1 \leq m \leq j_y + j_u \\ e(k-(m-j_y-j_u)) & j_y + j_u + 1 \leq m \leq j_y + j_u + j_e \end{cases}.$$

- j bezeichnet dabei die Anzahl der vergangenen Ausgangsgrößen j_y , die Anzahl der vergangenen Eingangsgrößen j_u und die Anzahl der vergangenen Störgrößen j_e , die im NARMAX Modell berücksichtigt werden. j , bzw. j_y , j_u und j_e , sind dabei Parametrierungsmöglichkeiten und können gewählt werden. Für ein galvanisches Element als technisches System ist beispielsweise die Wahl von $j_y = j_u = j_e \leq 5$ ausreichend.

- Um das parametrische Modell, beispielsweise das NARMAX-Modell, für das technische System zu identifizieren, werden N bekannte Datenpunkte herangezogen. Ein Datenpunkt ist dabei die Ausgangsgröße $y(N)$ bei einer bestimmten Eingangsgröße $u(N)$, und gegebenenfalls Störgröße $e(N)$. Ein Datenpunkt kann am technischen System gemessen werden, oder kann bekannt sein. Diese Darstellung ist linear in den Parametern θ , womit das polynomiale NARMAX oder NARX Modell in die Matrixform $Y = P\theta [+e]$ gebracht werden kann, mit dem Ausgangsvektor $Y = [y(1), y(2), \dots, y(N)]^T$, dem Parametervektor $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p]^T$, gegebenenfalls einem Störvektor $e = [e(1), e(2), \dots, e(N)]^T$, und der Regressormatrix P , die vergangene Ausgangsgrößen $y(k-m)$ und vergangene Eingangsgrößen $u(k-(m-j_y))$ enthält. Dieses lineare Gleichungssystem kann beispielsweise mit der Least-Mean-Square Methode gelöst werden: $\hat{\theta} = (P^T P)^{-1} P^T Y$, woraus sich die p Parameter θ des polynomialen NARMAX Modells ergeben.

- 25 Eine bessere Modellgüte kann erreicht werden, indem die Regressormatrix P mit einem bekannten Orthogonalisierungsverfahren, beispielsweise dem Gram-Schmidtschem Orthogonalisierungsverfahren, in eine orthogonale Matrix W und eine Dreiecksmatrix A zerlegt wird. Die Matrizen W und A ergeben sich dabei aus dem jeweiligen Orthogonalisierungsverfahren.

Die derartige Transformation in den orthogonalen Raum ist vorteilhaft, weil ein parametrisches Modell, wie das polynomiale NARMAX oder NARX Modell, eine sehr große Anzahl an potentiellen Parametern θ enthalten kann, wobei viele davon zum Beschreiben des Eingangs-/Ausgangsverhalten des technischen Systems überhaupt nicht relevant sind. Eine Lösung von diesem überbestimmten Gleichungssystem ist oftmals numerisch schwierig oder sogar unmöglich, da die Regressormatrix P sehr schlecht konditioniert ist. Die Transformation erlaubt hingegen neben der Berechnung der unbekannten Parameter θ auch eine Bewertung welche der Parameter θ wichtig sind und welche der Parameter θ nicht benötigt werden (eine sogenannten Strukturselektion)

10 Daraus kann ein Ersatzproblem formuliert werden in der Form

$$y = \underbrace{(PA^{-1})}_W \underbrace{(A\theta)}_g [+e] = Wg [+e].$$

Durch die Transformation bildet die Regressormatrix P eine orthogonale Basis und die Parameter g_i können unabhängig voneinander durch obige Gleichung berechnet werden. Die einzelnen Regressoren (Elemente der Regressormatrix P) können dabei hinsichtlich Signifi-

15 kanz beurteilt werden mit einem Fehleranteil ERR_i der Form $ERR_i = \frac{g_i^2 \langle w_i, w_i \rangle}{\langle y, y \rangle} \times 100\%$,

wobei w_i die Spalten der Matrix W sind und $\langle \cdot, \cdot \rangle$ das innere Vektorprodukt zweier Vektoren

ist. Damit können die einzelnen Regressoren nach Wichtigkeit beurteilt werden, beispielsweise in dem nur Regressoren verwendet werden, die einen vorgegebenen Fehleranteil ERR_i aufweisen. Alternativ dazu könnten die einzelnen Regressorkandidaten nach absteigender

20 Wichtigkeit (gemessen am Fehleranteil ERR_i) sortiert werden und in absteigender Reihenfolge hinzugefügt werden, bis ein vorgegebener Gesamtfehler ERR_G erreicht ist, also z.B. $ERR = \sum_i ERR_i > ERR_G$ (beispielsweise 99,9%) erreicht ist. Die anderen Regressoren werden auf Null gesetzt. Danach kann das Ersatzproblem mit den ausgewählten Regressoren im orthogonalen Raum gelöst werden. Die Lösung ergibt sich beispielsweise in der Form

25 $g_i = \frac{\langle y, w_i \rangle}{\langle w_i, w_i \rangle}$. Die Parameter g_i müssen dann nur mehr zurücktransformiert werden, indem

das Gleichungssystem $A\theta=g$ gelöst wird. Auch das ist grundsätzlich bekannt, beispielsweise aus Kapitel 3.2 von Billings.

Aus dem derart identifizierten NARMAX oder NARX Modell des technischen Systems, beispielsweise des galvanischen Elements, können die Volterra-Kernel direkt analytisch abge-

30 leitet werden. Ein Beispiel dafür ist der sogenannte bekannte Recursive Probing Algorithmus (oftmals auch als Harmonic Probing Algorithmus bezeichnet), beschrieben in Kapitel 6 von Billings. Dabei nutzt man aus, dass man durch die Volterra-Reihe bei gegebenem harmoni-

schen Input (Ansatzfunktionen) die prinzipielle Antwort des technischen Systems (Harmonische, Intermodulationen, etc.) weiß. Man setzt nun jetzt den Modellausgang $y(t)$ von Volterra-Reihe und parametrischen (NARMAX, NARX) Modell gleich. Für die Terme des parametrischen Modells (vergangene Outputs und Inputs) werden nun diese bekannten Ansatzfunktionen eingesetzt. Als einzige unbekannte im Gleichungssystem verbleiben dabei die Volterra-Kernel, nach denen aufgelöst werden kann, wobei der Volterra-Kernel n -ter Ordnung abhängig ist vom Volterra-Kernel $(n-1)$ -ter Ordnung, usw. Daraus können die Volterra-Kernel rekursiv ermittelt werden.

Das führt zu einer analytischen Lösung für die gesuchten Volterra-Kernel $H_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)$

(der Einfachheit halber auch oft als $H_n(\omega_1, \dots, \omega_n)$ bezeichnet) im Frequenzbereich, d.h.

dass die Volterra-Kernel als Funktionen der Frequenzen ω_n dargestellt werden können. Ein Volterra-Kernel, als komplexe Funktion, hat damit eine Verstärkung (Amplitude) und Phase. Alternativ könnte auch bereits ein NARMAX oder NARX Modell des technischen System bekannt sein, das dann verwendet werden kann, um die Volterra-Kernel $H_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)$

abzuleiten.

Zur erfindungsgemäßen Ermittlung der optimalen Anregefrequenz(en) ω_m zur Diagnose des technischen Systems werden zuerst die Volterra-Kernel $H_{n,nom}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ n -ter Ordnung mit $n > 1$, insbesondere der Volterra-Kernel 2. Ordnung ($n=2$) $H_{2,nom}(\omega_1, \omega_2)$, für einen fehlerfreien Betrieb des technischen Systems identifiziert. D.h., es wird ein parametrisches Modell für einen fehlerfreien Betriebszustand wie oben beschrieben identifiziert und daraus die Volterra-Kernel $H_{n,nom}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ n -ter Ordnung bestimmt. Danach wird das technische System gezielt in einen definierten Fehlerzustand geführt und erneut die Volterra-Kernel $H_{n,fault}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$, insbesondere der Volterra-Kernel 2. Ordnung ($n=2$) $H_{2,fault}(\omega_1, \omega_2)$, für einen fehlerbehafteten Betrieb des technischen Systems identifiziert. Nun wird erfindungsgemäß der Unterschied zwischen dem fehlerfreien Kernel $H_{n,nom}$ n -ter Ordnung und dem fehlerbehafteten Kernel $H_{n,fault}$ n -ter Ordnung ausgewertet. Dazu wird ein Bewertungskernel $H_{n,diff}$ n -ter Ordnung als Funktion des fehlerfreien Kernel $H_{n,nom}$ n -ter Ordnung und des fehlerbehafteten Kernel $H_{n,fault}$ n -ter Ordnung, also

$H_{n,diff}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = f(H_{n,fault}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n), H_{n,nom}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n))$, ermittelt und ausge-

wertet. Es kann beispielsweise ein Bewertungskernel $H_{n,diff}$ n -ter Ordnung als Quotient aus dem fehlerfreien Kernel $H_{n,nom}$ n -ter Ordnung und dem fehlerbehafteten Kernel $H_{n,fault}$ n -ter

Ordnung $H_{n,diff}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = \frac{H_{n,fault}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)}{H_{n,nom}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)}$, beispielsweise der Bewertungs-

kernel 2. Ordnung $H_{2,diff}(\omega_1, \omega_2) = \frac{H_{2,fault}(\omega_1, \omega_2)}{H_{2,nom}(\omega_1, \omega_2)}$, bestimmt werden. Ebenso könnte als Be-

wertungskernel $H_{n,diff}$ n-ter Ordnung die Differenz aus dem fehlerfreien Kernel $H_{n,nom}$ n-ter Ordnung und dem fehlerbehafteten Kernel $H_{n,fault}$ n-ter Ordnung

$$H_{n,diff}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = |H_{n,fault}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) - H_{n,nom}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)|, \text{ beispielsweise der}$$

Bewertungskernel 2.Ordnung $H_{2,diff}(\omega_1, \omega_2) = |H_{2,fault}(\omega_1, \omega_2) - H_{2,nom}(\omega_1, \omega_2)|$, bestimmt

- 5 werden. Der Quotient $H_{n,fault}/H_{n,nom}$ beschreibt die relative Veränderung bei einem Fehlerfall und die Differenz $H_{n,fault}-H_{n,nom}$ die absolute Größe der Veränderung. Die beiden Größen können sowohl einzeln als auch in Kombination bewertet werden.

Der Bewertungskernel $H_{n,diff}$ kann nun dahingehend ausgewertet werden, dass die Frequenzbereiche gesucht werden, in denen eine Verstärkung des Bewertungskernel $H_{n,diff}$ vor-
 10 liegt, die eine definierte Grenzverstärkung überschreitet. Vorzugsweise wird die Frequenz gesucht, wo sich die maximale Verstärkung ergibt. Der Differenzkernel 2.Ordnung ist hierbei besonders vorteilhaft, da dieser noch einfach grafisch als 3D-Plot oder als Konturplot der Verstärkung dargestellt werden kann, was die Auswertung vereinfacht. Das wird anhand der Figuren 1 bis 3 am Beispiel eines Volterra-Kernels 2.Ordnung und dem Quotienten als Be-
 15 wertungskernel $H_{2,diff}$ erläutert.

Fig.1 zeigt die Verstärkung des Volterra-Kernels 2.Ordnung $H_{2,nom}$ eines technischen Systems, beispielsweise eines galvanischen Elements, im fehlerfreien Zustand. Fig.2 zeigt die Verstärkung des Volterra-Kernels 2.Ordnung $H_{2,fault}$ desselben technischen Systems im fehlerbehafteten Zustand, d.h. in einem konkreten, eindeutigen Fehlerfall. Dargestellt ist jeweils
 20 der Volterra-Kernel 2.Ordnung $H_{2,nom}$ als zweidimensionaler Konturplot der Verstärkung in Abhängigkeit von den Frequenzen ω_1, ω_2 , die in den Figuren wie in diesen Zusammenhang oftmals üblich als mit der halben Abtastfrequenz normalisierte Frequenz aufgetragen ist. Nachdem die Volterra-Kernel komplexe Funktionen sind, kann für einen Volterra-Kernel die Verstärkung (als Betrag der komplexen Funktion, also des Volterra-Kernels) und die Phase,
 25 jeweils als Funktion der Frequenzen $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$, berechnet und dargestellt werden.

In Fig. 3 ist der Bewertungskernel $H_{2,diff}(\omega_1, \omega_2) = \frac{H_{2,fault}(\omega_1, \omega_2)}{H_{2,nom}(\omega_1, \omega_2)}$ der Volterra-Kernel

2.Ordnung des technischen Systems dargestellt. Die größte Verstärkung des Bewertungskernels (wieder als Betrag des komplexen Bewertungskernel) kann bei den auftretenden harmonischen Frequenzen erwartet werden, also bei $\omega_1 = \omega_2$, die durch eine Diagonale im
 30 Bewertungskernel H_{diff} repräsentiert wird. Die größte Verstärkung muss aber nicht unbedingt bei den harmonischen Frequenzen auftreten, sondern kann z.B. auch bei Intermodulationen auftreten. Die größte Verstärkung tritt im dargestellten Beispiel im Bereich von $\omega_1 = \omega_2 = [0,01, 0,02]$ auf. Wird also die Anregefrequenz ω_m des technischen Systems in diesem Bereich gewählt, kann mit einer guten Anregung des zugrundeliegenden Fehlerzustandes, der

den fehlerbehafteten Volterra-Kernel $H_{2,\text{fault}}$ hervorgerufen hat, gerechnet werden. Diese Auswertung erfolgt am einfachsten manuell, kann aber natürlich auch durch Maximalwertsuchen (auch als Bereichssuchen) automatisiert werden.

5 Damit ist aber auch ersichtlich, dass optimale Anregefrequenzen ω_m des technischen Systems für verschiedene Fehlerzustände ermittelt werden können.

Wenn nun dem Eingangssignal $u(t)$ des zugrunde liegenden technischen Systems im Normalbetrieb ein Anregesignal $a(t)$ mit einer derart ermittelten Anregefrequenz ω_m überlagert wird, kann im Fehlerfall mit einer bestmöglichen, für den Fehlerzustand charakteristischen Anregung des Ausgangssignals $y(t)$ gerechnet werden.

10 Wenn die Volterra-Kernel 2.Ordnung für die Bestimmung der Anregefrequenzen verwendet werden, ergeben sich somit zwei Anregefrequenzen (ω_{m1} , ω_{m2}), die beispielsweise mit einem Anregesignal $a(t) = A_1 \cos(\omega_{m1} t) + A_2 \cos(\omega_{m2} t)$ eingebracht werden könnten. Wenn $\omega_{m1} = \omega_{m2} = \omega_m$ ist, dann kann als Anregesignal beispielsweise auch $a(t) = A \cos(\omega_m t)$ verwendet werden.

15 Das Anregesignal $a(t)$ ist im Vergleich zu den Amplituden des Eingangssignals von geringer Amplitude (z.B. A , A_1 , A_2 kleiner 10%, vorzugsweise kleiner 5%, der zu erwartenden maximalen Amplitude des Eingangssignals), um den Normalbetrieb des technischen Systems nicht zu stören. Die laufende Diagnose des Betriebs des technischen Systems kann dann beispielsweise in bekannter Weise laufend mit der Elektrochemischen Impedanzspektroskopie
20 oder der Total Harmonic Distortion Analysis durchgeführt werden.

Selbstverständlich können auf diese Weise mit dem Anregesignal $a(t)$ gleichzeitig durch verschiedene weitere Anregefrequenzen ω_m auch verschiedene Fehlerzustände angeregt werden. Die verschiedenen Fehlerzustände können dann im Frequenzspektrum der Ausgangsgröße festgestellt werden, je nachdem in welchem Frequenzbereich des Frequenzspektrums
25 eine Reaktion festgestellt wird.

Wenn mehrere Anregefrequenzen ω_{mp} , $p \geq 1$, im Anregesignal $a(t)$ enthalten sind, dann ist es wichtig, dass sich die Anregefrequenzen ω_{mp} nicht gegenseitig im Frequenzspektrum beeinflussen, was durch geeignete Auswahl einfach sichergestellt werden kann. Auf eine saubere Trennung der sich ergebenden Frequenzspektren ist daher zu achten, um die verschiedenen
30 Fehlerzustände sauber auseinander halten zu können.

Quasi als „Abfallprodukt“ der erfindungsgemäßen Methode erhält man durch die Identifikation der Volterra-Kernel auch ein nicht-lineares, genaues Zeitmodell (polynomiales NARMAX oder NARX Modell). Damit ergeben sich Möglichkeiten für eine Fülle an weiteren Diagnosemöglichkeiten auf Basis des Zeitmodells, die unter dem Sammelbegriff Model-based Fault

Diagnosis and Isolation (FDI) bekannt sind. Das identifizierte Zeitmodell kann dabei auch im online Betrieb des technischen Systems laufend mitgerechnet und aktualisiert werden.

Das parametrische Modell des technischen Systems, z.B. ein NARMAX oder NARX Modell, kann vorliegen, oder kann vorab identifiziert werden, wie nachfolgend anhand eines galvanischen Elements als technisches System 1 beschrieben wird. Das beispielhafte technische System in Form des galvanischen Elements ist in Fig.4 dargestellt.

An das galvanische Element in Form einer Brennstoffzelle sind elektrische Verbraucher 2a, 2b, wie z.B. ein Hybridantriebsstrang oder eine Fahrzeugbatterie, angeschlossen. Zwischen Brennstoffzelle und den Verbrauchern 2a, 2b kann in bekannter Weise auch ein Leistungsteil 3 angeordnet sein, um den Energiefluss sowie die Spannungs- und Strompegel zu regeln.

Das galvanische Element kann auch, insbesondere im Fall einer Brennstoffzelle, an eine, nicht näher beschriebene, hinlänglich bekannte, Gaskonditionierung 4 angeschlossen, die dazu dient, die Reaktionsgase für die Brennstoffzelle bedarfsgerecht aufzubereiten, insbesondere betreffend, Druck, Feuchtigkeit, Temperatur, Massenfluss. Es kann auch eine Gasquelle 5, z.B. für Wasserstoff, vorgesehen sein. Die Gaskonditionierung ist schematisch dargestellt und wird nicht im Detail beschrieben. Fehler in der Gaskonditionierung können zu fehlerhaften Betriebszuständen im galvanischen Element führen. Ein Reaktionsgas kann beispielsweise zu feucht oder zu trocken sein, der Druck eines Reaktionsgases kann zu hoch sein, der Massenfluss eines Reaktionsgases kann zu niedrig sein, usw. Ebenso können im galvanischen Element Schädigungen, z.B. eine beschädigte Ionenaustauschmembran einer Zelle, oder Veränderungen auftreten, die als Fehlerzustände erkannt werden können. Solche Fehlerzustände führen zu suboptimalem Betrieb des galvanischen Elements und können sogar zur Beschädigung oder Zerstörung des galvanischen Elements führen. Es ist daher wichtig, den Betriebszustand des galvanischen Elements laufend zu überwachen, um im Fehlerfall rasch entsprechende Gegenmaßnahmen ergreifen zu können. Die Überwachung soll anhand des Strom- und Spannungsverlaufs des galvanischen Elements, also den Eingangs- und Ausgangsgrößen des technischen Systems 1, erfolgen.

Es wird nun das galvanische Element in einen fehlerfreien Betriebszustand geführt, d.h. dass z.B. die Gaskonditionierung fehlerfrei arbeitet und alle Reaktionsgase ausreichend und richtig konditioniert vorliegen und dass kein anderer Fehlerzustand vorliegt. In diesem Zustand wird dem galvanischen Element ein Eingangssignal $u(t)$, hier z.B. in Form eines zeitlichen Stromverlaufs $I(t)$, eingeprägt, das das galvanische Element möglichst gut anregen soll, um das statische und dynamische Verhalten des galvanischen Elements möglichst gut erfassen zu können. Ein geeignetes Eingangssignal $u(t)$ ist beispielsweise ein Stromverlauf $I(t)$ in Form eines amplitudenmodulierten Pseudo Random Binary Sequence (APRBS) Signals, wie in Fig.5 dargestellt, oder ein Random Gaussian Sequence Signal. Das sich daraus ergebende Ausgangssignal $y(t)$, hier z.B. in Form des zeitlichen Spannungsverlaufs $U(t)$, ist in Fig.6

für eine kurze Zeitspanne dargestellt. Das Eingangssignal $u(t)$ und Ausgangssignal $y(t)$ werden mit einer vorgegebenen Abtastrate, z.B. 100Hz, abgetastet, woraus sich die Datenpunkte ergeben und woraus wie oben skizziert ein NARMAX oder NARX Modell identifiziert wird.

Das identifizierte NARX Modell ergibt sich beispielsweise in der Form

$$\begin{aligned}
 y(k) = & -0.4453u(k-2) + 0.0059y(k-4) + 1.2348y(k-1) + 0.5177u(k-3) + \\
 & + 0.0015y(k-1)u(k-2) - 0.0018y(k-1)u(k-3) - 0.0004u(k-2)u(k-2) - \\
 & - 0.0323y(k-2) - 0.0121y(k-5) + 0.0407 + 0.0003u(k-2)u(k-3) - \\
 & - 0.0005y(k-1)y(k-1) - 0.2171y(k-3) + 0.0003y(k-1)y(k-3) - \\
 & - 0.0874u(k-5) + 0.0004y(k-3)u(k-5) - 0.0002y(k-3)u(k-3)
 \end{aligned}$$

Dieses parametrische Modell kann dann wie oben ausgeführt analytisch in den Frequenzbereich transformiert werden, woraus sich die Volterra-Kernel im Frequenzbereich ergeben.

Das wird wiederholt, wobei das galvanische Element nun in einem definierten Fehlerzustand betrieben wird, beispielsweise mit zu niedriger relativer Feuchtigkeit eines Prozessgases.

Aus dem Bewertungskernel wird dann die zumindest eine Anregefrequenz ω_m identifiziert, mit der das technische System 1 angeregt werden muss, um diesen Fehlerzustand im laufenden Betrieb des technischen Systems 1 bestmöglich anzuregen und so diagnostizierbar zu machen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Diagnose eines technischen Systems (1), das ein Eingangssignal ($u(t)$) auf ein Ausgangssignal ($y(t)$) abbildet, wobei dem Eingangssignal ($u(t)$) im Betrieb des technischen Systems (1) ein Anregesignal ($a(t)$) mit zumindest einer Anregfrequenz (ω_m) überlagert wird und zur Diagnose das Eingangssignal ($u(t)$) und/oder das Ausgangssignal ($y(t)$) analysiert wird, um einen Fehlerzustand des technischen System (1) festzustellen, **dadurch gekennzeichnet, dass** technische System (1) als Volterra-Reihe mit Volterra-Kernel ($H_n(\omega_1, \dots, \omega_n)$) modelliert wird, **dass** im fehlerfreien Zustand des technischen Systems (1) ein Volterra-Kernel ($H_{n,nom}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) n-ter Ordnung für den fehlerfreien Zustand ermittelt wird, **dass** für einen definierten Fehlerzustand des technischen Systems (1) ein Volterra-Kernel ($H_{n,fault}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) n-ter Ordnung für den fehlerbehafteten Zustand ermittelt wird, **dass** ein Bewertungskernel ($H_{n,diff}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) n-ter Ordnung als Funktion des Volterra-Kernels ($H_{n,nom}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) n-ter Ordnung für den fehlerfreien Zustand und des Volterra-Kernel ($H_{n,fault}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) n-ter Ordnung für den fehlerbehafteten Zustand ermittelt wird **und dass** der Bewertungskernel ($H_{n,diff}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) n-ter Ordnung ausgewertet wird, um einen Frequenzbereich zu bestimmen, in dem die Verstärkung des Bewertungskernels ($H_{n,diff}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) einen vorgegebenen Grenzwert übersteigt und die Anregfrequenz (ω_m) für das Anregesignal ($a(t)$) aus diesem Frequenzbereich gewählt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Bewertungskernel ($H_{n,diff}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) der Quotient des Volterra-Kernels ($H_{n,nom}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) n-ter Ordnung für den fehlerfreien Zustand und des Volterra-Kernel ($H_{n,fault}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) n-ter Ordnung für den fehlerbehafteten Zustand ermittelt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Bewertungskernel ($H_{n,diff}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) die Differenz des Volterra-Kernels ($H_{n,nom}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) n-ter Ordnung für den fehlerfreien Zustand und des Volterra-Kernel ($H_{n,fault}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) n-ter Ordnung für den fehlerbehafteten Zustand ermittelt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Anregfrequenz (ω_m) für das Anregesignal ($a(t)$) ausgewählt wird, bei der die Verstärkung des Bewertungskernels ($H_{n,diff}(\omega_1, \dots, \omega_n)$) n-ter Ordnung einen Maximalwert annimmt.

5. Verfahren nach Anspruch 1 oder 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** das technische System (1) im Zeitbereich mittels eines parametrischen Modells, insbesondere ein polynomiales NARMAX oder NARX Modell, beschrieben wird, von dem die Volterra-Kernel $(H_n(\omega_1, \dots, \omega_n))$ analytisch abgeleitet werden können.
- 5 6. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Volterra-Kernel $(H_n(\omega_1, \dots, \omega_n))$ aus dem parametrischen Modell mit einem Harmonic Probing Algorithmus abgeleitet werden.

1/3

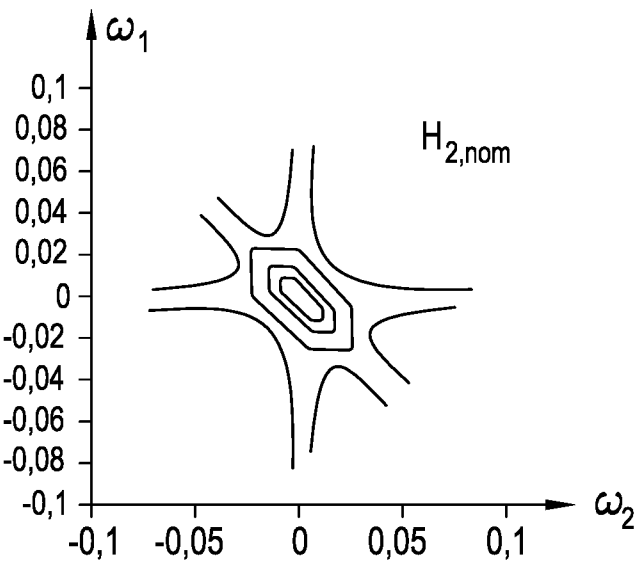


Fig. 1

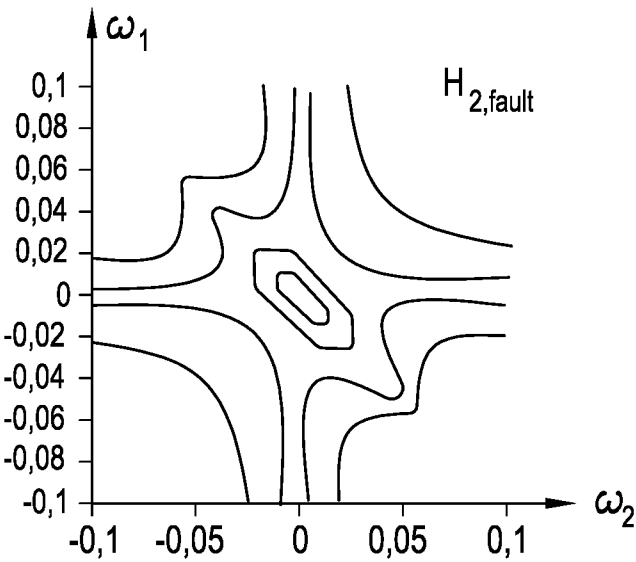


Fig. 2

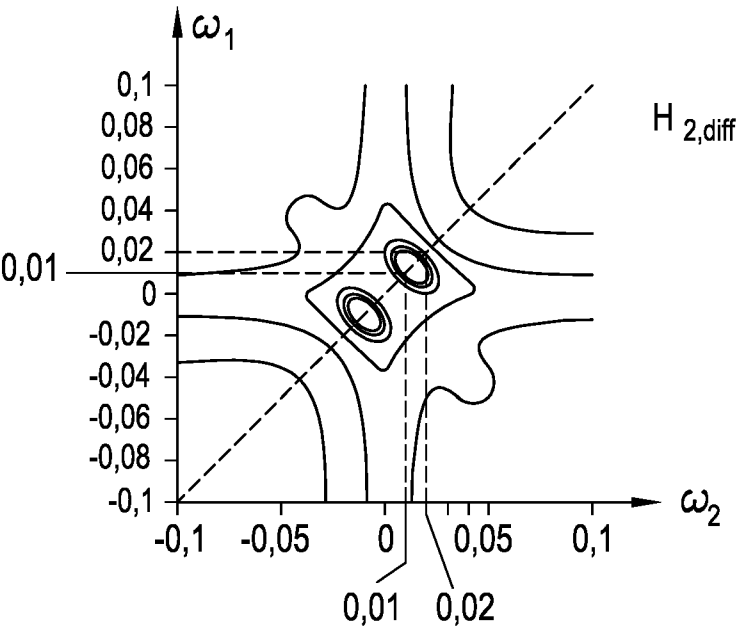


Fig. 3

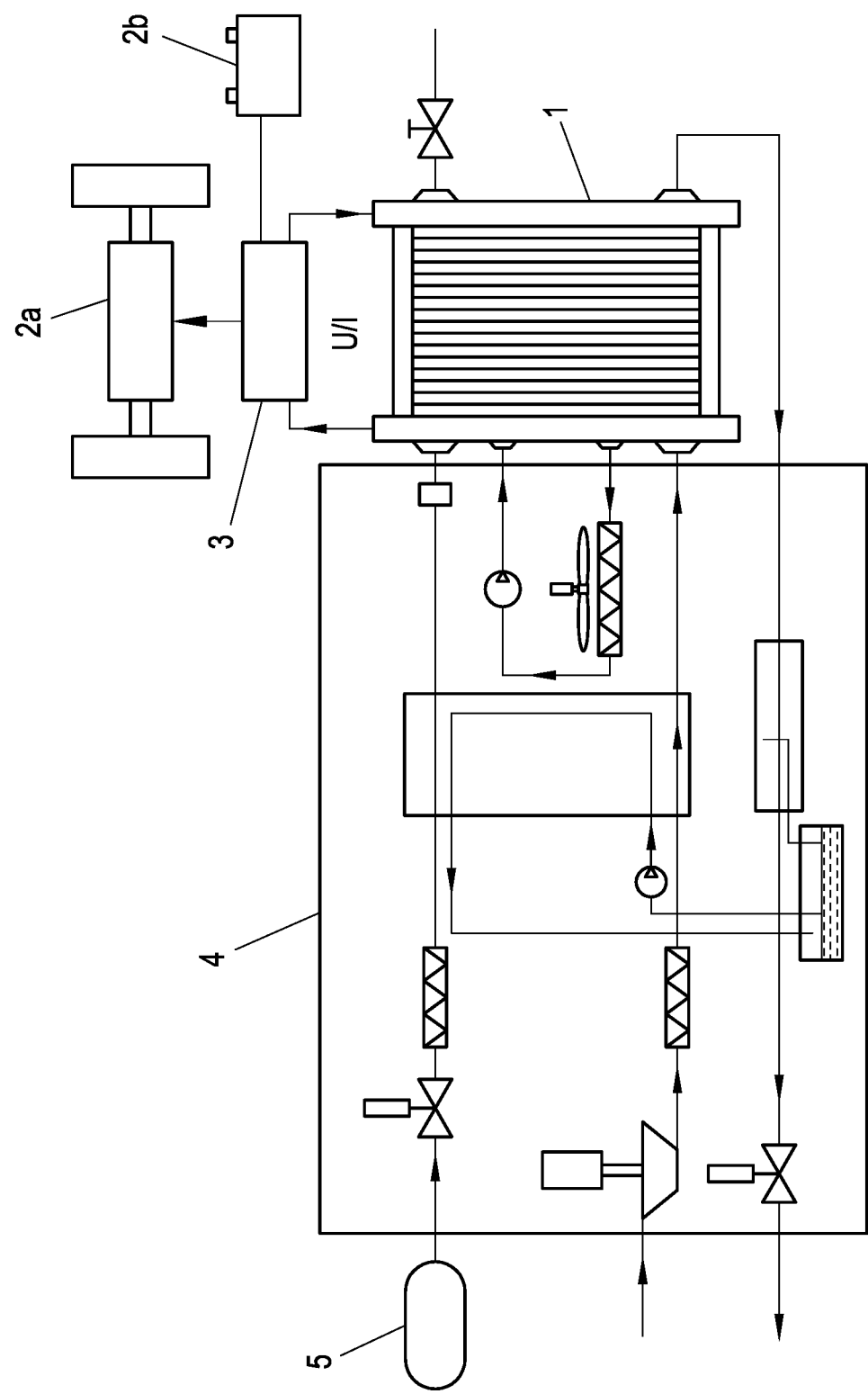


Fig. 4

3/3

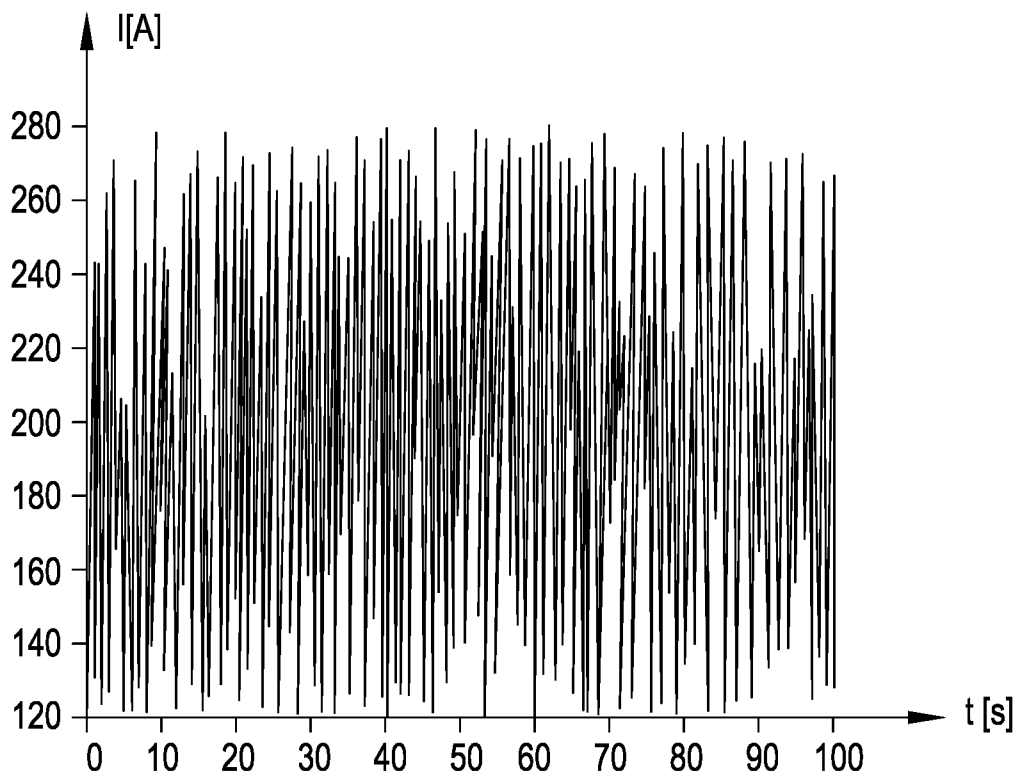


Fig. 5

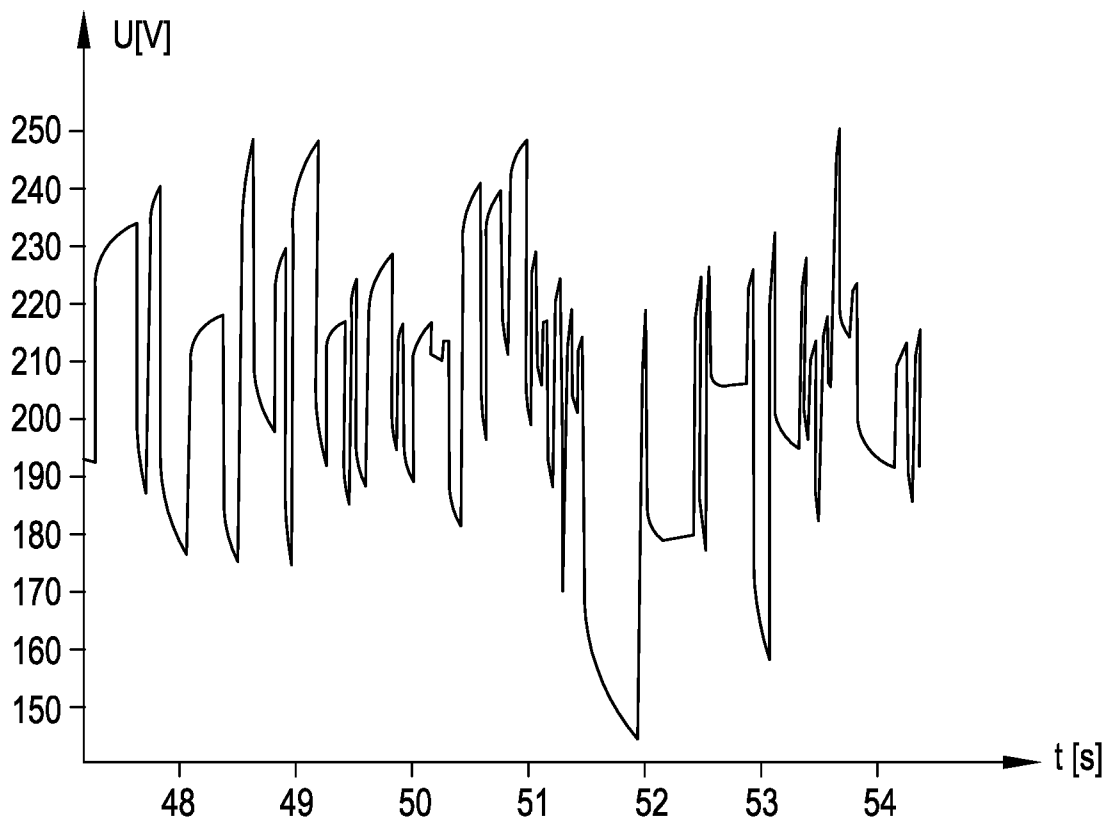


Fig. 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2017/078007

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G01R31/36 H01M8/04992
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G01R H01M

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	KADYK T ET AL: "Nonlinear frequency response analysis of PEM fuel cells for diagnosis of dehydration, flooding and CO-poisoning", JOURNAL OF ELECTROANALYTICAL CHEMISTRY AND INTERFACIAL ELECTROCHEMISTRY, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL, vol. 630, no. 1-2, 15 May 2009 (2009-05-15), pages 19-27, XP026044120, ISSN: 0022-0728, DOI: 10.1016/J.JELECHEM.2009.02.001 [retrieved on 2009-02-10]	1-3
Y	abstract; figures 1-14 page 19, column 2 - page 26 ----- -/-	4,5



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

22 February 2018

Date of mailing of the international search report

02/03/2018

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Kleiber, Michael

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2017/078007

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	BORIS BENSMANN ET AL: "Nonlinear Frequency Response of Electrochemical Methanol Oxidation Kinetics: A Theoretical Analysis", JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY, vol. 157, no. 9, 1 January 2010 (2010-01-01), page B1279, XP055452827, US ISSN: 0013-4651, DOI: 10.1149/1.3446836 abstract; figures 1-5 page 1280, column 2 - page 1282, column 1 page 1283, column 2 page 1286, column 2 - page 1287, column 1 -----	4
Y	PENG Z K ET AL: "Feasibility study of structural damage detection using NARMAX modelling and Nonlinear Output Frequency Response Function based analysis", MECHANICAL SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL, vol. 25, no. 3, 14 September 2010 (2010-09-14), pages 1045-1061, XP028363605, ISSN: 0888-3270, DOI: 10.1016/J.YMSSP.2010.09.014 [retrieved on 2010-10-21] abstract page 1046, paragraph 2 page 1048, paragraph 2 - page 1049, paragraph 3 -----	5
A	DE 10 2005 020318 A1 (INFINEON TECHNOLOGIES AG [DE]) 16 November 2006 (2006-11-16) abstract; figures 1-5 paragraphs [0011] - [0020], [0035] - [0079] -----	1-6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2017/078007

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DE 102005020318 A1	16-11-2006	DE 102005020318 A1	16-11-2006
		US 2006264187 A1	23-11-2006

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
 INV. G01R31/36 H01M8/04992
 ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
 G01R H01M

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	KADYK T ET AL: "Nonlinear frequency response analysis of PEM fuel cells for diagnosis of dehydration, flooding and CO-poisoning", JOURNAL OF ELECTROANALYTICAL CHEMISTRY AND INTERFACIAL ELECTROCHEMISTRY, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL, Bd. 630, Nr. 1-2, 15. Mai 2009 (2009-05-15), Seiten 19-27, XP026044120, ISSN: 0022-0728, DOI: 10.1016/J.JELECHEM.2009.02.001 [gefunden am 2009-02-10]	1-3
Y	Zusammenfassung; Abbildungen 1-14 Seite 19, Spalte 2 - Seite 26 ----- -/-	4,5



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

22. Februar 2018

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

02/03/2018

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Kleiber, Michael

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	BORIS BENSMANN ET AL: "Nonlinear Frequency Response of Electrochemical Methanol Oxidation Kinetics: A Theoretical Analysis", JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY, Bd. 157, Nr. 9, 1. Januar 2010 (2010-01-01), Seite B1279, XP055452827, US ISSN: 0013-4651, DOI: 10.1149/1.3446836 Zusammenfassung; Abbildungen 1-5 Seite 1280, Spalte 2 - Seite 1282, Spalte 1 Seite 1283, Spalte 2 Seite 1286, Spalte 2 - Seite 1287, Spalte 1 -----	4
Y	PENG Z K ET AL: "Feasibility study of structural damage detection using NARMAX modelling and Nonlinear Output Frequency Response Function based analysis", MECHANICAL SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL, Bd. 25, Nr. 3, 14. September 2010 (2010-09-14), Seiten 1045-1061, XP028363605, ISSN: 0888-3270, DOI: 10.1016/J.YMSSP.2010.09.014 [gefunden am 2010-10-21] Zusammenfassung Seite 1046, Absatz 2 Seite 1048, Absatz 2 - Seite 1049, Absatz 3 -----	5
A	DE 10 2005 020318 A1 (INFINEON TECHNOLOGIES AG [DE]) 16. November 2006 (2006-11-16) Zusammenfassung; Abbildungen 1-5 Absätze [0011] - [0020], [0035] - [0079] -----	1-6

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

PCT/EP2017/078007

Formblatt PCT/ISA/210 (Anhang Patentfamilie) (April 2005)