

(19)



(11)

EP 4 088 077 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:

27.12.2023 Patentblatt 2023/52

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):

F28G 15/00^(2006.01) F22B 37/56^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **21711796.9**

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):

F28G 15/003; F22B 37/56; F28F 2200/00

(22) Anmeldetag: **05.03.2021**

(86) Internationale Anmeldenummer:

PCT/EP2021/055563

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:

WO 2021/180581 (16.09.2021 Gazette 2021/37)

(54) **VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR ERMITTLUNG VON FOULING BEI EINEM WÄRMETAUSCHER**

METHOD AND DEVICE FOR DETERMINING FOULING IN A HEAT EXCHANGER

PROCÉDÉ ET DISPOSITIF DE DÉTERMINATION DE L'ENCRASSEMENT DANS UN ÉCHANGEUR DE CHALEUR

(84) Benannte Vertragsstaaten:

AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR

(74) Vertreter: **Siemens Patent Attorneys**

**Postfach 22 16 34
80506 München (DE)**

(30) Priorität: **09.03.2020 EP 20161837**

(56) Entgegenhaltungen:

**EP-A1- 2 128 551 DE-A1- 19 502 096
DE-A1-102016 225 528 DE-B4-102005 055 333**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:

16.11.2022 Patentblatt 2022/46

(73) Patentinhaber: **Siemens Aktiengesellschaft**

80333 München (DE)

- **ZOLZER K ET AL: "EINSATZ DES KESSEL-DIAGNOSE-SYSTEMS KEDI IM KRAFTWERK STAUDINGER 5. REALISIERUNG UND BETRIEBSERFAHRUNG", VGB KRAFTWERKSTECHNIK, VGB KRAFTWERKSTECHNIK GMBH. ESSEN, DE, Bd. 75, Nr. 9, 1. September 1995 (1995-09-01), Seiten 755-762, XP000525900, ISSN: 0372-5715 in der Anmeldung erwähnt**

(72) Erfinder:

- **KAUB, Jonas
76131 Karlsruhe (DE)**
- **LABISCH, Daniel
76149 Karlsruhe (DE)**

EP 4 088 077 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Ermittlung von Fouling bei einem Wärmetauscher gemäß Patentanspruch 1 und 2 bzw. Patentanspruch 14 und 15.

[0002] Wärmetauscher, häufig auch als Wärmeübertrager bezeichnet, sind technische Apparate, die verwendet werden, um ein Medium zu heizen oder zu kühlen. Hierzu wird Wärme von einem wärmeren ersten Medium an ein kälteres zweites Medium übertragen. Je nach Bauform unterscheiden sich Wärmetauscher in ihrem Funktionsprinzip. Die häufigsten Bauformen werden in eine der drei Funktionsgruppen Gleichstrom-, Gegenstrom oder Kreuzstromwärmetauscher eingeordnet.

[0003] Das zu heizende oder zu kühlende Medium wird häufig auch als "Produktmedium" bezeichnet und das Heiz- oder Kühlmedium wird häufig auch als "Servicemedium" bezeichnet. Das Servicemedium kann beispielsweise Heißdampf oder Kühlwasser sein. Das Servicemedium strömt üblicherweise entweder durch eine Leitungsanordnung, welche innerhalb des Produktmediums angeordnet ist, oder umströmt eine Leitungsanordnung, die vom Produktmedium durchströmt wird.

[0004] Das erste und das zweite Medium werden durch den Wärmetauscher geleitet, wobei die beiden Medien üblicherweise durch eine Wand getrennt aneinander vorbeifließen und dabei durch die Wand die Wärme des wärmeren Mediums an das kältere Medium abgeben wird.

[0005] Ein zentrales Problem bei Wärmetauschern stellt das so genannte "Fouling" dar, bei dem sich an den Innenwänden des Wärmetauschers Ablagerungen oder Beläge bilden. Die Gründe für die Entstehung solcher Ablagerungen können physikalischer, chemischer, oder biologischer Natur sein. Sie lassen sich in vielen Fällen, z.B. aufgrund der gegebenen produktseitigen Rahmenbedingungen, nicht verhindern. Die Beläge hemmen den Wärmeübergang zwischen den Medien und reduzieren dadurch den Wirkungsgrad des Wärmetauschers. Ist ein bestimmter Grad der Verschmutzung erreicht, wird eine chemische oder mechanische Reinigung oder ggf. sogar der Austausch des Wärmetauschers notwendig. Dieses Problem ist besonders ausgeprägt bei großen Industriewärmetauschern, die in verfahrenstechnischen Prozessanlagen (d.h. z.B. Anlagen der Branchen Chemie, Petrochemie, Glas, Papier, Metallerzeugung oder Zement) oder in Kraftwerken zum Einsatz kommen und dort üblicherweise auf eine Wärmeübertragungsleistung von mehr als 100 kW ausgelegt sind.

[0006] Von außen ist es sehr schwer festzustellen, wie stark die Verschmutzung im Inneren des Wärmetauschers ist, so dass es nicht möglich ist, den Wärmetauscher bedarfsabhängig zu reinigen oder zu ersetzen. Ein Temperaturreglerkreis ist bis zu einem bestimmten Grad in der Lage, die Auswirkungen der Verschmutzung zu kompensieren, sodass die Verschmutzungen nicht sofort an der Ausgangstemperatur des Produktmediums erkennbar werden. Aufgrund dieser Unkenntnis ist es häufig nicht möglich, den Wärmetauscher bedarfsabhängig zu reinigen oder zu ersetzen.

[0007] Bisher werden von Verschmutzung betroffene Wärmetauscher deshalb in regelmäßigen Zeitabständen gereinigt oder ausgetauscht, also ohne Wissen über den tatsächlichen Verschmutzungszustand. Bei diesem Vorgehen können die Wartungsintervalle nicht abhängig von verschiedenen starken Verschmutzungsgraden angepasst werden. Infolgedessen kann die Reinigung oder der Austausch des Wärmetauschers beispielsweise zu früh erfolgen, obwohl bis dahin nur geringfügige Ablagerungen vorhanden sind. Dies würde zwar den effizienten Betrieb des Wärmetauschers gewährleisten, wäre jedoch unwirtschaftlich, weil sowohl direkte Kosten für die Wartungsarbeiten entstehen, als auch indirekte Kosten durch die zusätzliche Beeinträchtigung des laufenden Betriebs der Anlage, in der der Wärmetauscher eingesetzt ist. Werden entsprechende Maßnahmen zu spät durchgeführt, so führen übermäßige Ablagerungen im Inneren des Wärmetauschers bereits zu einem deutlich verringerten Wärmeübergang. Die Folge ist, dass für den gleichen zu übertragenen Wärmestrom ein viel größerer Durchfluss des Servicemediums benötigt wird als im sauberen Zustand des Wärmetauschers der Fall ist. Dies führt zu einem erhöhten Energieaufwand, welcher für die Bereitstellung des Servicemediums aufgewandt wird, also Heiz- und Pumpleistung, was ebenfalls einen Kostenfaktor darstellt. Weiterhin besteht bei starker Belagbildung auch die Gefahr einer verschlechterten Qualität des Produktmediums, da beispielsweise Temperaturvorgaben nicht adäquat eingehalten werden.

[0008] Aus der EP 2 128 551 A1 ist ein Verfahren zur Überwachung der Wirksamkeit eines Wärmetauschers in Hinblick auf Fouling bekannt, bei dem ein aktueller Wärmestrom \dot{Q}_P des Produktmediums oder \dot{Q}_S des Servicemediums erfasst und mit mindestens einem Referenz-Wärmestrom \dot{Q}_{Ref} verglichen wird, der einem vorbestimmten Verschmutzungsgrad, z.B. dem Verschmutzungsgrad Null und einem maximal zulässigen Verschmutzungsgrad, des Wärmetauschers entspricht. Der jeweilige Referenz-Wärmestrom \dot{Q}_{Ref} wird in Abhängigkeit von dem aktuellen Arbeitspunkt des Wärmetauschers aus einem vorher mit Hilfe eines Simulationsprogrammes für unterschiedliche Arbeitspunkte erstellten und abgespeicherten Kennfeld ermittelt, wobei der Arbeitspunkt des Wärmetauschers durch die Durchflüsse F_P , F_S beider Medien und ihre Temperaturen $T_{P, Ein}$, $T_{S, Ein}$ bei Eingang in den Wärmetauscher bestimmt ist. Durch den Einsatz des Simulationsprogramms kann die Arbeitspunktabhängigkeit der übertragbaren Wärmemenge beispielsweise an mehreren hundert Stützstellen vorherberechnet werden, ohne entsprechend zeitaufwendige Messungen an der realen Anlage durchführen zu müssen.

[0009] Aus der WO 2019/001683 A1 ist ein Verfahren zur Überwachung eines Wärmetauschers bekannt, bei dem die

Durchflüsse, Eintrittstemperaturen und Austrittstemperaturen von Service- und Produktmedium Prozessgrößen darstellen, von denen produktseitig mindestens eine Prozessgröße variabel ist und serviceseitig die Eintrittstemperatur festgelegt ist und die übrigen Prozessgrößen variabel sind. Zur Überwachung des Wärmetauschers ohne Temperaturmessung auf der Serviceseite ist vorgesehen, die variable(n) Prozessgröße(n) des Produktmediums und den Durchfluss des Servicemediums zu messen und aus den dabei in einem Referenzzustand des Wärmetauschers erhaltenen Messwerten ein Kennfeld für die gegenseitige Abhängigkeit der variablen Prozessgröße(n) des Produktmediums und des Durchflusses des Servicemediums zu ermitteln und abzuspeichern. Für die in einem aktuellen unbekanntem Zustand des Wärmetauschers erhaltenen Messwerte wird dabei ein Abstand des von ihnen gebildeten Messwert-Tupels von dem Kennfeld als Maß für eine Abweichung des aktuellen Zustands des Wärmetauschers von dem Referenzzustand ermittelt.

[0010] Aus Zolzer K et al. "Einsatz des Kessel-Diagnose-Systems KEDI im Kraftwerk Staudinger 5", VGB Kraftwerkstechnik, Essen, DE, Bd. 75, Nr. 9, 1. September 1995, Seiten 755-762, ISSN: 0372-5715, der DE 195 02 096 A1, US 4 390 058 A oder EP 0 470 676 A2 ist es bekannt, zur Überwachung von Wärmetauschern den Wärmedurchgangskoeffizienten oder k-Wert zu betrachten. Der innerhalb des Wärmetauschers übertragene Wärmestrom $\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T_M$ hängt von diesem k-Wert, von der Austauschfläche A und von der den Wärmeübergang treibenden sog. logarithmischen Temperaturdifferenz ΔT_M ab. Sowohl der k-Wert als auch die logarithmische Temperaturdifferenz sind jeweils von dem Arbeitspunkt des Wärmetauschers und damit von den Durchflüssen F_P , F_S des Produkt- und Servicemediums und ihren Temperaturen $T_{P, Ein}$, $T_{S, Ein}$ bei Eintritt in den Wärmetauscher abhängig.

[0011] Im Fall der DE 195 02 096 A1 welche den Oberbegriff der Ansprüche 1 und 2 offenbart, wird für jede Heizfläche ein aktueller K-Wert aus einer berechneten Wärmeleistung, einer logarithmischen Temperaturdifferenz und der Heizflächengröße ermittelt. Durch Vergleich des aktuellen K-Wertes mit einem gespeicherten Referenz-K-Wert K_{ref} für den "sauberst möglichen Zustand" wird ein Reinigungszustand CF berechnet nach der Beziehung $CF = K/K_{ref}$. Die Referenzwerte K_{ref} werden in Abhängigkeit von der Last und eventuell in Abhängigkeit vom Brennstoff in einem Speicher abgelegt. Die Referenzwerte K_{ref} können einigen aktuellen Zustandsgrößen entsprechend mit Korrekturfaktoren korrigiert werden. So erfolgt beispielsweise eine Korrektur nach der Dampfgeschwindigkeit. Es bleibt aber offen, auf welche Art und Weise die Referenzwerte gewonnen werden.

[0012] Im Fall von Zölzer ist eine sogenannte "Heizflächenwertigkeit FV" als Maß für eine Heizflächenverschmutzung definiert. Diese ist definiert als das Verhältnis von einem Istbewertungsfaktor f_{ist} zu einem Basisbewertungsfaktor f_{Basis} . Der Istbewertungsfaktor f_{ist} ist das Verhältnis eines "gemessenen" Wärmedurchgangskoeffizienten K_{ist} zu einem theoretischen Wärmedurchgangskoeffizienten $K_{Theorie}$. Der "gemessene" Wärmedurchgangskoeffizient K_{ist} wird anhand der Medientemperaturen und der Heizflächengröße ermittelt. Der theoretischen Wärmedurchgangskoeffizient $K_{Theorie}$ wird u.a. anhand der Geometriedaten wie Rohrabmessung, Breite- und Längsteilung usw. der Heizfläche bestimmt. Der Basisbewertungsfaktor f_{Basis} wird aus einem als optimal geltendem Betriebszustand mit vorhandener Grundverschmutzung, z.B. Abnahmeversuch des Dampferzeugers, ermittelt und abgespeichert. Die Berechnung des Referenzzustandes beinhaltet eine Nachrechnung des Dampferzeugers mit den im System abgespeicherten Basisdaten und einigen momentanen Prozessdaten, wie Speisewasser-, Frischdampf und ZÜ-Parametern. Genaue Details zu den verwendeten Prozessdaten sind aber nicht offenbart.

[0013] Die DE 10 2016 225 528 A1 offenbart ein Verfahren zur Überwachung eines Verschmutzungszustandes bei einem Wärmetauscher mit Hilfe eines zusätzlichen Temperatursensors, der in oder an der Wärmetauscherwand angeordnet ist. Der Temperatursensor erfasst eine Betriebs-Wandtemperatur des Wärmetauschers. Diese Betriebs-Wandtemperatur wird korrekturgerechnet und eine Abweichung zwischen der korrekturgerechneten Betriebs-Wandtemperatur und einer Referenz-Wandtemperatur ermittelt. Die Korrektur der Betriebs-Wandtemperatur berücksichtigt Messwertveränderungen, die sich durch von Referenzbedingungen abweichenden Betriebsbedingungen einstellen, wie z.B. Abweichungen in den Fluidtemperaturen oder in den Volumenströmen der Fluide. Betriebs-Wandtemperatur und Referenz-Wandtemperatur sind Werte, die an derselben Stelle gemessen und/oder für dieselbe Stelle am Wärmetauscher vorgegeben sind.

[0014] Ein aktueller Fouling-Widerstand R_f kann aus der Differenz zwischen einem aktuellen Wärmedurchgangswiderstand $1/k_{ist}$ und einem Wärmedurchgangswiderstand $1/k_{soll}$, der im sauberen Zustand des Wärmetauschers ermittelt wurde, berechnet werden:

$$R_f = \frac{1}{k_{ist}} - \frac{1}{k_{soll}}$$

Wie sich aber herausgestellt hat, ist eine Auswertung des Fouling-Widerstandes auf dieser Basis ungenau. Beispielsweise kommt es zu Niveausprüngen des Wärmedurchgangswiderstands ohne ersichtlichen besonderen Grund, wie er z.B. bei einer Reinigung oder einem Austausch des Wärmetauschers vorliegen würde.

[0015] Es ist deshalb Aufgabe vorliegender Erfindung, ein Verfahren und eine Vorrichtung anzugeben, mit denen eine

noch genauere Ermittlung von Fouling bei einem Wärmetauscher erfolgen kann.

[0016] Die Lösung dieser Aufgabe gelingt durch ein Verfahren gemäß Patentanspruch 1 sowie gemäß Patentanspruch 2 und eine Vorrichtung gemäß Patentanspruch 14 sowie gemäß Patentanspruch 15. Ein Computerprogramm ist Gegenstand des Patentanspruchs 16. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind jeweils Gegenstand der Unteransprüche.

[0017] Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird zur Ermittlung von Fouling ein Wert für eine das Fouling charakterisierende Größe aus einem Wert für eine von dem Fouling beeinflussten ersten Größe und einem Wert einer zweiten Größe ermittelt, wobei eine durch eine Änderung einer Eigenschaft des ersten und/oder des zweiten Mediums, insbesondere eines Durchflusses des ersten und/oder des zweiten Mediums durch den Wärmetauscher, bewirkte Änderung der ersten Größe von der zweiten Größe zumindest teilweise kompensiert wird.

[0018] Die das Fouling charakterisierende Größe ist vorzugsweise ein Wärmedurchgangswiderstand oder eine Wärmedurchgangslleitfähigkeit. Es kann sich aber beispielsweise auch um einen Strömungswiderstand handeln.

[0019] Die Erfindung beruht auf der Erkenntnis, dass sich Niveausprünge der das Fouling charakterisierenden Größe häufig mit Durchflussänderungen des ersten und/oder des zweiten Mediums erklären lassen. Der Grund liegt darin, dass sich bei Durchflussänderungen auch die Strömungsgeschwindigkeit und die Strömungsart an den Stellen des Wärmeübergangs von dem ersten zu dem zweiten Medium ändern kann. Je nach sich dann einstellender Strömungsart (z.B. laminare Strömung, schwach turbulente Strömung, stark turbulente Strömung) und Strömungsgeschwindigkeit kann es dann aber auch zu Änderungen des Wertes der von dem Fouling beeinflussten ersten Größe kommen. Selbst innerhalb einer Strömungsart kann sich die Durchmischung und somit der Wärmeübergang in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit ändern. Beispielsweise bildet auch eine turbulente Strömung an den Randbereichen laminare Grenzschichten, deren Größe und damit Einfluss beispielsweise vom Durchfluss bzw. der Strömungsgeschwindigkeit abhängt. Für eine genauere Ermittlung eines Wertes der das Fouling charakterisierenden Größe werden deshalb erfindungsgemäß diese Änderungen berücksichtigt. Hierzu wird eine durch eine Änderung eines Durchflusses des ersten und/oder des zweiten Mediums durch den Wärmetauscher bewirkte Änderung der ersten Größe von der zweiten Größe zumindest teilweise kompensiert. Mit anderen Worten bewirkt eine Änderung des Durchflusses des ersten und/oder zweiten Mediums eine entsprechende Änderung der zweiten Größe, die dann zur Kompensation des Einflusses der Durchflussänderung auf die erste Größe genutzt wird. Hierdurch lassen sich sehr gut aus Messdaten berechnete - bisher unerklärliche - Niveausprünge der ersten Größe erklären und kompensieren.

[0020] Die Erfindung ermöglicht auch bei einer Durchflussänderung für verschiedene Wärmetauscher eine zuverlässige Quantifizierung des Fouling-Widerstands. Dabei ist kein Wissen über Stoffeigenschaften oder bauliche Eigenschaften des Wärmetauschers notwendig. Die Erfindung funktioniert rein messdatenbasiert. Anstatt nur den Wärmedurchgangswiderstand oder die Wärmedurchgangslleitfähigkeit (bzw. den Wärmedurchgangskoeffizient (k-Wert)) oder den Strömungswiderstand als Indikator für das Fouling zu verwenden, nutzt die Erfindung diese Größe und bindet gleichzeitig den Einfluss der Strömungsdynamik der beiden Medien auf das Endergebnis mit ein.

[0021] Da erfindungsgemäß nicht der Wärmestrom, sondern der Wärmedurchgangswiderstand oder die Wärmedurchgangslleitfähigkeit (bzw. ein Wärmedurchgangskoeffizient (k-Wert)) oder der Strömungswiderstand betrachtet wird, ist der darin enthaltene Fouling-Widerstand von Vorteil unabhängig vom Betriebspunkt.

[0022] Es wird zudem kein Modell des Wärmetauschers benötigt, das von einem Experten aufwendig angefertigt werden müsste. Alle Ergebnisse und Zwischenschritte lassen sich zudem in 2D- oder 3D- Kennfeldern darstellen. Es werden keine unanschaulichen mehrdimensionalen Kennfelder zur Berechnung benötigt.

[0023] Die Erfindung erfordert dabei keine speziellen zusätzlichen Messinstrumente (z.B. einen Temperatursensor an einer Wärmetauscherwand), sondern kommt mit der üblicherweise bei Wärmetauschern vorhandenen Instrumentierung aus.

[0024] Zudem kann auf eine der Messungen von Durchflüssen und Ein/Ausgangs-Temperaturen der Medien auch verzichtet werden, sodass nicht einmal eine vollständige Instrumentierung vorausgesetzt wird.

[0025] Wenn einzelne Prozessgrößen des Produktmediums oder Servicemediums, beispielsweise die Eintrittstemperatur, aufgrund von gegebenen Rahmenbedingungen festgelegt sind und daher als unveränderlich angenommen werden können, brauchen sie ebenfalls nicht gemessen zu werden.

[0026] Eine Erfassung weiterer Größen wie Stoffeigenschaften der beiden Medien oder bauliche Eigenschaften des Wärmetauschers ist nicht notwendig und deshalb auch nicht vorgesehen. Die Erfindung geht vielmehr davon aus, dass diese nicht bekannt sind. Es können hierfür beliebige Konstanten angenommen werden, die dann zwar zu absolut gesehen falschen Werten für die erste Größe, die zweite Größe und die das Fouling charakterisierende Größe führen, aber letztendlich sind die relativen Änderungen dieser Größen ausschlaggebend für die Funktionsweise und den Erfolg des Verfahrens. Dies ist auch in der Praxis in den meisten Fällen ausreichend.

[0027] Mit der Erfindung konnte am Beispiel eines Industrie-Wärmetauschers ein deutlich besseres Ergebnis bei der Ermittlung von Fouling erzielt werden als mit einer konventionellen Berechnung. Die Ergebnisse könnten damit einen Anlagenfahrer zu einer deutlich besseren Bewertung des Fouling-Widerstandes verhelfen. Vorteilhafterweise kann die Erfindung nicht nur auf die Wärmebilanzen angewendet werden, sondern auch auf die Betrachtung der Druckdifferenzen und damit der Strömungswiderstände.

EP 4 088 077 B1

[0028] Eine besonders gute Kompensation der Durchflussänderungen kann erzielt werden, wenn die zweite Größe eine von dem Fouling unbeeinflusste Größe ist.

[0029] Die von dem Fouling beeinflusste erste Größe ist gemäß einer ersten Alternative der Erfindung ein Wärmedurchgangswiderstand oder eine Wärmedurchgangsleitfähigkeit (bzw. ein Wärmedurchgangskoeffizient, häufig auch als "k-Wert" bezeichnet). Der Wärmedurchgangswiderstand oder die Wärmedurchgangsleitfähigkeit (bzw. der k-Wert) kann besonders einfach aus Messwerten von Temperaturen des ersten Mediums und des zweiten Mediums jeweils an einem Eingang und an einem Ausgang des Wärmetauschers ermittelt werden.

[0030] Wenn die Wärme von dem ersten Medium zu dem zweiten Medium durch eine Wand übertragen wird, dann setzt sich beispielsweise der k-Wert in der Theorie wie folgt zusammen:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_2} + R_f}$$

bzw.

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_2} + R_f$$

mit

R_f : Fouling-Widerstand (in m^2K/W)

s_w : Wanddicke (in m)

λ_w : Wärmeleitfähigkeit der Wand (in W/mK)

α_1 : Wärmeübergangskoeffizient vom ersten Medium zur Wand (in W/m^2K)

α_2 : Wärmeübergangskoeffizient vom zweiten Medium zur Wand (in W/m^2K)

[0031] Änderungen des Durchflusses des ersten und/oder zweiten Mediums durch den Wärmetauscher können zu Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsart und somit zu Änderungen der Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{1,2}$ führen.

[0032] Mit

$$X = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{s_w}{\lambda_w}$$

ergibt sich

$$1/k = X + R_f$$

[0033] Der Fouling-Widerstand R_f lässt sich dann berechnen durch

$$R_f = 1/k - X.$$

[0034] Dabei sind

R_f : die das Fouling charakterisierende Größe,

$1/k$: die erste Größe,

X : die zweite Größe.

[0035] Die zweite Größe X ist hier folglich eine von dem Fouling unbeeinflusste Größe.

[0036] Vorzugsweise ist die zweite Größe somit ein Maß für den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen dem ersten Medium und der Wand, der Wärmeleitfähigkeit der Wand und den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen dem zweiten Medium und der Wand.

[0037] Gemäß einer zweiten Alternative der Erfindung ist die von dem Fouling beeinflusste Größe ein Strömungswi-

derstand des ersten oder des zweiten Mediums durch den Wärmetauscher. Ein Strömungswiderstand kann besonders einfach aus Messwerten von Drücken des ersten Mediums und des zweiten Mediums jeweils an einem Eingang und an einem Ausgang des Wärmetauschers ermittelt werden.

[0038] Gemäß einer besonders vorteilhaften ersten Ausgestaltung des Verfahrens (im Folgenden als "Methode 1" bezeichnet) wird hierzu im Zeitpunkt einer Durchflussänderung, insbesondere einer sprungartigen Änderung, der Wert der zweiten Größe derart geändert, dass der Wert der das Fouling charakterisierenden Größe konstant bleibt.

[0039] Jeweils nach einer Erstinbetriebnahme oder Reinigung des Wärmetauschers, d.h. wenn kein Fouling vorliegt, kann dabei ein Anfangswert der ersten Größe ermittelt (bzw. "erlernt") und die zweite Größe auf einen Anfangswert gesetzt werden, der dem Anfangswert der ersten Größe entspricht. Die beiden Größen kompensieren sich dann vollständig. Wenn dann im weiteren Betrieb des Wärmetauschers der Wert der ersten Größe aufgrund von Fouling und aufgrund von Durchflussänderungen steigt, bewirken die Durchflussänderungen eine entsprechende Änderung der zweiten Größe, die zu einer entsprechenden Kompensation der ersten Größe führen.

[0040] Diese Methode eignet sich vor allem für einen Betrieb des Wärmetauschers mit Betriebsphasen, bei denen der Durchfluss jeweils stückweise konstant ist und sich dann sprungartig ändert. Beispielsweise entspricht dies dem relativ häufigen Fall, dass der Durchfluss des Produktmediums geregelt ist, wobei die Sollwerte hierfür konstant vorgegeben werden. Eine konstante Durchflussänderung kann nur stückweise verarbeitet werden. Eine kontinuierliche Anpassung könnte dann jedoch über eine Interpolation zwischen den stückweisen Änderungen erfolgen. Vorteilhaft ist, dass Änderungen des Mediums nach einer Reinigung keinen Einfluss auf das Ergebnis haben und auch keine Lerndaten benötigt werden.

[0041] Gemäß einer besonders vorteilhaften zweiten Ausgestaltung des Verfahrens (im Folgenden als "Methode 2" bezeichnet) kann eine Funktion definiert sein, die einem Wert für einen Durchfluss durch den Wärmetauscher des ersten und/oder des zweiten Mediums jeweils einen Wert für die zweite Größe zuordnet.

[0042] Diese Funktion kann in einem Zeitintervall nach einer Erstinbetriebnahme des Wärmetauschers oder nach einer Reinigung des Wärmetauschers von Fouling ermittelt bzw. "erlernt" werden. Die Funktion wird vorzugsweise durch eine Regression von Messwerten des Durchflusses und zugehörigen Werten der zweiten Größe in dem Zeitintervall gebildet. Die Regression kann beispielsweise eine lineare Regression (wenn sich nur der Durchfluss eines der beiden Medien ändert) oder eine 3D-Regression (wenn sich die Durchflüsse beider Medien ändern) sein. Diese Methode kann auch konstante Änderungen berücksichtigen, ist relativ resistent gegenüber Abweichungen im normalen Betrieb und benötigt dafür aber auch mehrere Reinigungen (und danach mehrere unterschiedliche Durchflussänderungen) zum "Anlernen" der Funktion. Es ermöglicht auch Vergleiche zwischen der Qualität von Reinigungen.

[0043] Gemäß einer besonders vorteilhaften dritten Ausgestaltung des Verfahrens (im Folgenden als "Methode 3" bezeichnet) sind Wertebereiche für den Durchfluss definiert, denen jeweils ein Wert für die zweite Größe zugeordnet ist. Die Zuordnung der Werte der zweiten Größe zu dem Durchfluss wird hierbei von Vorteil in einem Zeitintervall nach einer Erstinbetriebnahme des Wärmetauschers oder nach einer Reinigung des Wärmetauschers von Fouling ermittelt bzw. "erlernt". Optional können an den Bereichsgrenzen die Übergänge zwischen Werten der zweiten Größe etwas gefiltert werden, damit sie sich nicht zu stark ändern. Zwischen den verschiedenen erlernten Punkten kann auch interpoliert werden, anstatt zu quantisieren, um einen "sanfteren" Übergang zu erzeugen.

[0044] Das Zeitintervall für das Definieren der Funktion bzw. der bereichsweisen Werte-Zuordnungen ist abhängig von der Geschwindigkeit der Fouling-Vorgänge und kann beispielsweise zwischen einigen Stunden (bei schnellen Fouling-Vorgängen, die z.B. zu wöchentlichen Reinigungen des Wärmetauschers führen) und einigen Tagen (bei langsamen Fouling-Vorgängen, die z.B. zu monatlichen Reinigungen des Wärmetauschers führen) liegen.

[0045] Es sind dabei auch Kombinationen sowie Erweiterungen der drei vorgenannten Methoden möglich. Beispielsweise lässt sich immer beim Auftreten einer Durchflussänderung die Methode 1 anwenden und die Sprunghöhe und Kompensationshöhe als neuer Lernpunkt in Methode 2 und 3 berücksichtigen. Damit sind auch Lernpunkte in einem verschmutzten Zustand möglich.

[0046] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens wird eine Kennlinie für einen Zusammenhang zwischen der zweiten Größe und dem Durchfluss eines der beiden Medien ermittelt, wobei zur Ermittlung der Kennlinie in einem ersten Schritt eine Kennlinie einer mathematische Ableitung der ersten Größe nach dem Durchfluss des Mediums ermittelt wird und in einem zweiten Schritt die in dem ersten Schritt erhaltene Kennlinie wieder in Bezug auf den Durchfluss des Mediums integriert wird.

[0047] Diese Methode nutzt die Tatsache, dass die das Fouling charakterisierende Größe einem langsamen und halbwegs gleichmäßigen Trend folgt. Der Zusammenhang zwischen der ersten Größe und dem Durchfluss verschiebt sich damit ständig, sodass keine direkte Schätzung des Zusammenhangs möglich ist. Es besteht somit das Problem, eine Kennlinie (statischer Zusammenhang) zwischen zwei Größen zu schätzen. Neben dem statischen Zusammenhang wirkt auf die abhängige Größe dabei zusätzlich ein additiver Trend.

[0048] Grundidee zur Lösung dieses Problems ist, die Ableitung der ersten Größe nach dem Durchfluss (z.B. $(d1/k)/dF$) zu schätzen, aus der das Fouling herausgerechnet werden kann. Die Integration der Ableitung liefert dann wieder den eigentlichen Zusammenhang, wobei offensichtlich der Absolutwert verloren geht. Dieser ist jedoch in der

Anwendung auch nicht notwendig, da lediglich relative Durchflussänderungen kompensiert werden müssen.

[0049] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens werden gleichzeitig eine erste Kennlinie für einen Zusammenhang zwischen der zweiten Größe und dem Durchfluss des ersten Mediums und eine zweite Kennlinie für einen Zusammenhang zwischen der zweiten Größe und dem Durchfluss des zweiten Mediums ermittelt, wobei zur Ermittlung der Kennlinien in einem ersten Schritt für jedes der beiden Medien jeweils eine Kennlinie einer mathematischen Ableitung der ersten Größe nach dem Durchfluss des jeweiligen Mediums ermittelt wird und in einem zweiten Schritt die in dem ersten Schritt erhaltenen Kennlinien wieder in Bezug auf den Durchfluss des jeweiligen Mediums integriert werden.

[0050] Dieses Verfahren ist besonders vorteilhaft bei gleichzeitigen Änderungen der Durchflüsse beider Medien. Hier sind somit zwei Kennlinien (statische Zusammenhänge) zwischen jeweils zwei Größen zu schätzen. Neben den statischen Zusammenhängen wirkt auf die abhängige Größe dabei zusätzlich ein additiver Trend. Angewandt auf den Wärmetauscher überlagern sich die Einflüsse der beiden Kennlinien für die zweite Größe in Abhängigkeit des Durchflusses des jeweiligen Mediums.

[0051] Die beiden letztgenannten Ausgestaltungen des Verfahrens haben den Vorteil, dass man nicht darauf angewiesen ist, die Kennlinien nach einer Reinigung zu lernen, da die Foulingauswirkung durch die Ableitungsbildung weitgehende kompensiert wird.

[0052] Eine erfindungsgemäße Vorrichtung zur Durchführung des vorstehend beschriebenen erfindungsgemäßen Verfahrens umfasst

- eine Einrichtung zum Empfang von Messwerten oder daraus abgeleiteten Größen des Wärmetauschers und
- eine Auswerteinrichtung, die eingerichtet ist, aus den Messwerten oder den abgeleiteten Größen einen Wert für eine das Fouling charakterisierende Größe aus einem Wert für eine von dem Fouling beeinflussten ersten Größe und einem Wert einer zweiten Größe zu ermitteln, wobei eine durch eine Änderung eines Durchflusses des ersten Mediums und/oder des zweiten Mediums durch den Wärmetauscher bewirkte Änderung der ersten Größe von der zweiten Größe zumindest teilweise kompensiert wird.

[0053] Die erste Größe kann dabei ein Wärmedurchgangswiderstand oder eine Wärmedurchgangsleitfähigkeit (bzw. ein Wärmedurchgangskoeffizient (k-Wert)) sein, wobei die erste Größe und die zweite Größe aus mehreren der folgenden Messgrößen

- Temperaturen des ersten Mediums und des zweiten Mediums am Eingang und am Ausgang des Wärmetauschers und
- Durchflüsse des ersten Mediums und des zweiten Mediums durch den Wärmetauscher

ermittelt wird und ohne dass bei der Ermittlung der ersten und der zweiten Größe Stoffeigenschaften des ersten Mediums und des zweiten Mediums und bauliche Eigenschaften des Wärmetauschers verwendet werden.

[0054] Die erste Größe kann aber auch ein Strömungswiderstand sein, wobei die erste Größe und die zweite Größe aus mehreren der folgenden Messgrößen

- Drücke des ersten Mediums und des zweiten Mediums am Eingang und am Ausgang des Wärmetauschers und
- Durchflüsse des ersten Mediums und des zweiten Mediums durch den Wärmetauscher

ermittelt wird und ohne dass bei der Ermittlung der ersten und der zweiten Größe Stoffeigenschaften des ersten Mediums und des zweiten Mediums und bauliche Eigenschaften des Wärmetauschers verwendet werden.

[0055] Bei den "abgeleiteten Größen" kann es sich beispielsweise um statistische Größen wie Mittelwerte, Minima, Maxima von Messwerten handeln.

[0056] Ein erfindungsgemäßes Computer-Programm umfasst Anweisungen, die, wenn das Programm auf einem Computer ausgeführt wird, den Computer veranlassen, ein vorstehend beschriebenes erfindungsgemäßes Verfahren auszuführen.

[0057] Ein entsprechendes Computer-Programm-Produkt umfasst ein Speichermedium, auf dem ein Programm mit Anweisungen gespeichert ist, die, wenn das Programm auf einem Computer ausgeführt wird, den Computer veranlassen, ein vorstehend beschriebenes erfindungsgemäßes Verfahren auszuführen.

[0058] Die Erfindung sowie weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung gemäß Merkmalen der Unteransprüche werden im Folgenden anhand von Ausführungsbeispielen in den Figuren näher erläutert; darin zeigen:

FIG 1 ein Blockschaltbild eines Wärmetauschers und einer Vorrichtung zur Ermittlung von Fouling in dem Wärmetauscher,

FIG 2 einen zeitlichen Verlauf eines normierten k-Werts für einen Industrie-Wärmetauscher gemäß dem Stand der

Technik,

- FIG 3 einen prinzipiellen zeitlichen Verlauf des FoulingWiderstandes ohne Durchflussänderung bei einer Berechnung gemäß Methode 1 der Erfindung,
- FIG 4 einen prinzipiellen zeitlichen Verlauf des FoulingWiderstandes bei einer Durchflussänderung bei einer Berechnung gemäß Methode 1 der Erfindung,
- FIG 5 einen zeitlichen Verlauf des $1/k$ -Werts für den Industrie-Wärmetauscher gemäß FIG 1 bei einer Berechnung gemäß Methode 1 der Erfindung,
- FIG 6 eine Anwendung einer linearen Regression am Beispiel des Industrie-Wärmetauschers von FIG 2,
- FIG 7 einen zeitlichen Verlauf des Fouling-Widerstand R_f für den Industrie-Wärmetauscher von FIG 2 bei einer Berechnung gemäß Methode 2 der Erfindung,
- FIG 8 einen zeitlichen Verlauf des Fouling-Widerstand R_f für den Industrie-Wärmetauscher von FIG 2 bei einer Berechnung gemäß Methode 3 der Erfindung,
- FIG 9 einen zeitlichen Verlauf der Korrekturgröße X für den Industrie-Wärmetauscher von FIG 2 bei einer Berechnung gemäß Methode 4 der Erfindung,
- FIG 10 einen zeitlichen Verlauf von Durchflüssen eines Servicemediums und eines Produktmediums für einen Industrie-Wärmetauscher für eine Foulingermittlung gemäß einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung,
- FIG 11 einen zeitlichen Verlauf von Temperaturen des Servicemediums und des Produktmediums in Relation zu den Durchflüssen gemäß FIG 10,
- FIG 12 einen zeitlichen Verlauf einer das Fouling charakterisierenden Größe ermittelt gemäß Methode 5 der Erfindung aus den Durchflüssen und Temperaturen gemäß FIG 10 und FIG 11,
- FIG 13 einen zeitlichen Verlauf von Durchflüssen eines Servicemediums und eines Produktmediums für einen Industrie-Wärmetauscher für eine Foulingermittlung gemäß einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung,
- FIG 14 einen zeitlichen Verlauf von Temperaturen des Servicemediums und des Produktmediums in Relation zu den Durchflüssen gemäß FIG 13,
- FIG 15 einen zeitlichen Verlauf einer das Fouling charakterisierenden Größe ermittelt gemäß Methode 6 der Erfindung aus den Durchflüssen und Temperaturen gemäß FIG 13 und FIG 14,
- FIG 16 ein Blockschaltbild eines Wärmetauschers und einer cloudbasierten Vorrichtung zur Ermittlung von Fouling in einem Wärmetauscher.

[0059] FIG 1 zeigt beispielhaft und in vereinfachter Darstellung einen Wärmetauscher 1 zur Übertragung von Wärme oder Kälte von einem Servicemedium S an ein Produktmedium P. Der Wärmetauscher 1 ist beispielhaft als ein Gegenstromwärmetauscher dargestellt, es sind aber auch andere Bauformen von Wärmetauschern möglich. Das Produktmedium P fließt durch eine Leitung 2. In Flussrichtung vor dem Wärmetauscher 1 werden mittels eines Durchflusssensors 4 und eines Temperatursensors 5 der Durchfluss F_P (bzw. die Durchflussrate oder der Volumenstrom) des Produktmediums und seine Temperatur $T_{P, Ein}$ vor dem Eintritt in den Wärmetauscher 1 gemessen. Ein in Flussrichtung hinter dem Wärmetauscher 1 angeordneter weiterer Temperatursensor 6 misst die Temperatur $T_{P, Aus}$ des aus dem Wärmetauscher 1 austretenden Produktmediums P.

[0060] Das Produktmedium P wird mittels eines Servicemediums S erwärmt oder gekühlt, das dem Wärmetauscher 1 aus einer Heizoder Kühlmittelversorgung zugeführt wird. In Flussrichtung vor dem Wärmetauscher 1 werden mittels eines Durchflusssensors 7 und eines Temperatursensors 8 der Durchfluss F_S (bzw. die Durchflussrate oder der Volumenstrom) des Servicemediums und dessen Temperatur $T_{S, Ein}$ vor dem Eintritt in den Wärmetauscher 1 gemessen. Ein in Flussrichtung hinter dem Wärmetauscher 1 angeordneter weiterer Temperatursensor 9 misst die Temperatur $T_{S, Aus}$ des aus dem Wärmetauscher 1 austretenden Servicemediums S.

[0061] Zur Überwachung des Wärmetauschers 1 in Hinblick auf Fouling werden der Durchfluss-Messwert F_P und die Temperatur-Messwerte $T_{P, Ein}$, $T_{P, Aus}$ des Produktmediums P und der Durchfluss-Messwert F_S sowie die Temperatur-Messwerte $T_{S, Ein}$, $T_{S, Aus}$ des Servicemediums S an eine Vorrichtung 10 zur Ermittlung von Fouling übertragen. Wenn einzelne Prozessgrößen des Produktmediums P oder des Servicemediums S, beispielsweise seine Eintrittstemperatur $T_{P, Ein}$ bzw. $T_{S, Ein}$, aufgrund von gegebenen Rahmenbedingungen festgelegt sind und daher als unveränderlich angenommen werden können, brauchen sie nicht gemessen zu werden.

[0062] Für die produkt- und serviceseitigen Wärmeströme \dot{Q}_P und \dot{Q}_S gilt:

$$\dot{Q}_P = C_{P, P} \cdot \rho_P \cdot F_P \cdot (T_{P, Aus} - T_{P, Ein})$$

und

$$\dot{Q}_S = - C_{P, S} \cdot \rho_S \cdot F_S \cdot (T_{S, Aus} - T_{S, Ein}) \cdot$$

[0063] Mit

- $c_{P,P}$ Wärmekapazität des Produktmediums,
- $c_{P,S}$ Wärmekapazität des Servicemediums,
- 5 ρ_P Dichte des Produktmediums,
- ρ_S Dichte des Servicemediums.

[0064] Unter Vernachlässigung von Verlusten geht die gesamte von dem Servicemedium S abgegebene Wärmemenge auf das Produktmedium P über, so dass beide Wärmeströme gleich sind ($\dot{Q}_P = \dot{Q}_S = \dot{Q}$).

10 [0065] Alternativ lässt sich der Wärmestrom auch mit folgender Formel berechnen, die sich aus dem mechanischen Aufbau des Wärmetauschers ergibt:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T_m.$$

15 [0066] Hierbei gilt:

- k : Wärmedurchgangskoeffizient (in W/m^2K)
- A : zur Verfügung stehende Fläche für Wärmeaustausch (in m^2)
- 20 ΔT_m : mittlere logarithmische Temperaturdifferenz
- \dot{Q} : Wärmestrom.

[0067] Die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz ΔT_m ist definiert als

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln\left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}\right)},$$

25 wobei ΔT_A für die Temperaturdifferenz der Eingangsseite (aus Sicht des Produktmediums) und ΔT_B für die der Austrittseite steht.

30 [0068] Damit kann der übertragene Wärmestrom in drei Varianten berechnet werden, als:

a) Wärmestrom, der von Medium 1 abgegeben wird

$$\dot{Q}_P = c_{P,P} \rho_P F_P (T_{P,Aus} - T_{P,Ein})$$

b) Wärmestrom, der durch den Wärmetauscher 1 hindurchtritt

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T_m$$

c) Wärmestrom, der von Medium 2 abgegeben wird

$$\dot{Q}_S = -c_{P,S} \rho_S F_S (T_{S,Aus} - T_{S,Ein})$$

[0069] Daraus folgt:

$$c_{P,P} \rho_P F_P (T_{P,Aus} - T_{P,Ein}) = k \cdot A \cdot \Delta T_m = -c_{P,S} \rho_S F_S (T_{S,Aus} - T_{S,Ein}) .$$

55 [0070] Allgemein geht man nun davon aus, dass der Fouling-Widerstand unabhängig vom Betriebspunkt ist. Der aktuelle Fouling-Widerstand kann aus der Differenz zwischen dem aktuellen Wärmedurchgangswiderstand $1/k_{ist}$ und dem Wärmedurchgangswiderstand $1/k_{soll}$, der im sauberen Zustand ermittelt wurde, berechnet werden.

EP 4 088 077 B1

$$R_f = \frac{1}{k_{ist}} - \frac{1}{k_{soll}}$$

5

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_2} + R_f}$$

[0071] Somit lässt sich der k-Wert mit der Formel

10

$$k = \dot{Q} \frac{1}{A} \frac{\ln\left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}\right)}{\Delta T_A - \Delta T_B}$$

15 berechnen, mit

$$\Delta T_A = T_{P, Ein} - T_{S, Aus} \quad \text{und} \quad \Delta T_B = T_{P, Aus} - T_{S, Ein}$$

20 für den Fall eines Gegenstromwärmetauschers.

[0072] Bei als konstant angesehenen Werten für A, $c_{p,p}$, $c_{p,s}$, ρ_p und ρ_s lässt sich ein relativer Wert für k somit lediglich mit Hilfe der Messwerte der ein- und ausgangsseitigen Temperaturen sowie der Durchflüsse der beiden Medien berechnen.

[0073] FIG 2 zeigt beispielhaft einen typischen Verlauf des $1/k$ -Wertes über der Zeit t für einen Industrierwärmetauscher. Zur Vereinfachung wurde ein zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ vorliegender k-Wert k_0 ermittelt und es ist in FIG 2 ein auf den Anfangswert k_0 bezogener Wert $1/k'$ dargestellt. Senkrechte Linien zeigen dabei die Reinigungszeitpunkte. In einigen Bereichen ist hier eine durch Fouling verursachte Abnahme von $1/k'$ zu erkennen. Es fallen aber an den mit einem Pfeil gekennzeichneten Stellen Niveausprünge auf, die eine genaue Auswertung des Fouling-Widerstandes erschweren.

[0074] Wie sich herausgestellt hat, kann die Ermittlung des Fouling-Widerstandes dadurch genauer erfolgen, dass Durchflussänderungen beim Produkt- und/oder Servicemedium bei der Auswertung mitberücksichtigt werden.

[0075] Wenn die Wärme von dem ersten Medium zu dem zweiten Medium durch eine Wand übertragen wird, dann setzt sich der k-Wert in der Theorie wie folgt zusammen:

35

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_2} + R_f}$$

bzw.

40

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_2} + R_f$$

mit

45

R_f : Fouling-Widerstand (in m^2K/W)

s_w : Wanddicke (in m)

λ_w : Wärmeleitfähigkeit der Wand (in W/mK)

α_1 : Wärmeübergangskoeffizient vom ersten Medium zur Wand (in W/m^2K)

50

α_2 : Wärmeübergangskoeffizient vom zweiten Medium zur Wand (in W/m^2K) .

[0076] Durchflussänderungen und damit Änderungen der Strömungsart oder innerhalb einer Strömungsart können zu Änderungen der Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{1,2}$ führen.

[0077] Mit

55

$$X = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{s_w}{\lambda_w}$$

ergibt sich

$$1/k = X + R_f.$$

5

[0078] Der Fouling-Widerstand R_f lässt sich dann berechnen durch

$$R_f = 1/k - X.$$

10

[0079] Dabei sind

R_f : eine das Fouling charakterisierende Größe,

$1/k$: eine erste Größe, die von dem Durchfluss beeinflusst ist,

15 X : eine zweite Größe, die nicht von dem Fouling beeinflusst ist.

[0080] Die zweite Größe X ist somit ein Maß für den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen dem ersten Medium und der Wand, der Wärmeleitfähigkeit der Wand und den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen dem zweiten Medium und der Wand.

20 **[0081]** Erfindungsgemäß werden nun durch Durchflussänderungen bewirkte Änderungen der ersten Größe, hier des berechneten k -Wertes, mit Hilfe einer zweiten Größe, hier eines Wertes der Größe X , zumindest teilweise kompensiert.

[0082] Anhand FIG 3 bis 10 werden nun drei Verfahren bzw. Methoden vorgestellt, wie der Durchfluss berücksichtigt werden kann:

25 Methode 1

[0083] Bei der Methode 1 wird der Wert für X bei jeder sprungartigen Durchflussänderung angepasst. Es wird dabei von folgenden Annahmen ausgegangen:

- 30
- Die Wanddicke und deren Wärmeleitfähigkeit ($s_w/\lambda_w = \text{konst.}$) ändern sich im Betrieb nicht,
 - die Eigenschaften der Medien ändern sich nicht oder nur unwesentlich,
 - der Fouling-Widerstand fällt oder steigt nicht signifikant ohne besonderen Grund (z.B. Reinigung) im normalen Betrieb.

35 **[0084]** In einer Lernphase direkt nach einer Reinigung wird ein Anfangswert für X erlernt: Für ein gewisses Zeitintervall nach einer Reinigung kann davon ausgegangen werden, dass der Fouling-Widerstand $R_f = 0$ ist.

40 **[0085]** In diesem Bereich werden die Werte für $1/\alpha_1$, $1/\alpha_2$ und s_w/λ_w erlernt (zusammengefasst im Wert X). Mit $R_f = 0$ und $X = 1/\alpha_1 + 1/\alpha_2 + s_w/\lambda_w$ kann mit dem vorher berechneten k -Wert k_0 nun X_0 für das Anfangsintervall (oder nach einem Reinigungsintervall) bestimmt werden. Es gilt hier $X_0 = 1/k_0$.

Fall 1: Die Durchflüsse ändern sich nicht

45 **[0086]** In diesem Fall ändern sich auch die Werte von α nicht, d.h. X bleibt weiterhin konstant. Jede Änderung des $1/k$ -Wertes ist also dem Fouling zuzuschreiben. Der Fouling-Widerstand kann somit mit der Formel $R_f = 1/k - X$ berechnet werden. FIG 3 zeigt hierzu beispielhaft einen Verlauf von $1/k$, X und R_f über der Zeit t . Der Wert X ist konstant und führt zu einem konstanten Unterschied zwischen $1/k$ und R_f .

Fall 2: Ein Durchfluss ändert sich zum Zeitpunkt t_0

50

[0087] Beim Zeitpunkt t_0 wird der Fouling-Widerstand $R_f(t_0)$ kurz konstant gehalten und X_{neu} z.B. mit $X_{neu} = 1/k - R_f(t_0)$ berechnet.

[0088] Für $1/k$ kann nun ein Mittelwert für ein Intervall von t_0 bis $t_0 + x$ genutzt werden. Alternativ lässt sich X_{neu} auch wie folgt berechnen: $X_{neu} = X_{alt} - (1/k_{alt} - 1/k_{neu})$.

55 **[0089]** $1/k_{alt}$ und $1/k_{neu}$ stehen hierbei für einen gemittelten $1/k$ -Wert in einem Intervall vor bzw. nach einer Durchflussänderung. Beide Ansätze zeigen fast identische Ergebnisse.

[0090] Im weiteren Verlauf wird der Fouling-Widerstand dann wieder über $R_f = 1/k_{neu} - X_{neu}$ berechnet.

[0091] FIG 4 zeigt hierzu beispielhaft einen Verlauf von $1/k$, X und R_f über der Zeit t . Wie ersichtlich ist, wird durch

diese Methode bei einem Sprung des Durchflusses im Zeitpunkt t_0 der Fouling-Widerstand R_f stetig fortgesetzt, anstatt zu einem Niveausprung zu führen.

[0092] Wird nun mit dieser Methode der $1/k$ -Wert, X und R_f für den Industrie-Wärmetauscher von FIG 2 berechnet und über der Zeit t aufgetragen, ergeben sich in FIG 5 gezeigte Verläufe. Gezeigt sind hierbei nur relative Werte. Senkrechte Linien zeigen dabei wieder die Reinigungszeitpunkte. Zur Vereinfachung wurden zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ vorliegende Anfangswerte $1/k_0$ und X_0 ermittelt und es sind in FIG 5 auf diese Anfangswerte bezogene Werte $1/k'$ und X' dargestellt.

[0093] Bei der Berechnung des $1/k'$ -Wertes fallen wieder an den mit einem Pfeil gekennzeichneten Stellen Niveausprünge auf, die bei der Berechnung des relativen Fouling-Widerstandes R_f aber durch Änderungen des X' -Wertes größtenteils kompensiert werden.

[0094] Diese Methode eignet sich vor allem für einen Betrieb des Wärmetauschers mit Betriebsphasen, bei denen der Durchfluss jeweils stückweise konstant ist und sich dann sprunghaft ändert. Eine konstante Durchflussänderung kann nur stückweise verarbeitet werden. Eine kontinuierliche Anpassung könnte dann jedoch über eine Interpolation zwischen den stückweisen Änderungen erfolgen. Vorteilhaft haben Änderungen des Mediums nach einer Reinigung keinen Einfluss auf das Ergebnis und es werden auch keine Lerndaten benötigt.

Methode 2

[0095] Wie schon beschrieben, kann in grober Näherung davon ausgegangen werden, dass der Fouling-Widerstand nach einer Reinigung ≈ 0 ist. Hier gilt $X(F) = 1/k$. Dieses Anfangsintervall wird nun genutzt, um für verschiedene Durchflüsse einen Zusammenhang zwischen X und F (Durchfluss) in Form einer Funktion f zu finden. Auch wenn sich der Durchfluss innerhalb dieses Intervalls ändert. Dafür lässt sich eine Regression, insbesondere eine lineare Regression, besser sogar noch eine nichtlineare Regression, nutzen. Mit dem Ergebnis aus dieser Interpolation kann für beliebige Durchflüsse ein entsprechender X -Wert berechnet werden.

[0096] FIG 6 zeigt beispielhaft eine Anwendung der linearen Regression am Beispiel des Industrie-Wärmetauschers von FIG 2. Um die lineare Regression zu erstellen und somit die Funktion f zu definieren, wurden nach einer Reinigung des Wärmetauschers für eine Anzahl gemittelter Durchflusswerte F_p der Produktseite die dazugehörigen X -Werte ermittelt (in FIG 6 mit "*" gekennzeichnet). Durchflussänderungen innerhalb dieses Intervalls sind dabei berücksichtigt. Es gilt somit: $X = f(F_p)$, wobei sich die Funktion f aus der linearen Regression von F_p und X ergibt.

[0097] Wird nun mit dieser Methode der relative Fouling-Widerstand R_f für den Industrie-Wärmetauscher von FIG 2 berechnet und zusammen mit den mittels der linearen Regression ermittelten Werten X über der Zeit t aufgetragen, ergibt sich ein in FIG 7 gezeigter Verlauf. Zur Vereinfachung wurde auch hier der zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ vorliegende Anfangswert X_0 ermittelt und es ist in FIG 7 ein auf diesen Anfangswert bezogener Wert X' dargestellt.

[0098] Wie ersichtlich ist, zeigt auch diese Methode in vielen Bereichen ein zufriedenstellendes Ergebnis.

[0099] Senkrechte Linien zeigen dabei wieder die Reinigungszeitpunkte.

[0100] Die Funktion f kann beispielsweise durch eine lineare Regression (wenn sich nur der Durchfluss eines der beiden Medien ändert, siehe FIG 6) oder eine 3D-Regression (wenn sich die Durchflüsse beider Medien ändern) von Messwerten von Durchflüssen und zugehörigen Werten der zweiten Größe in dem Zeitintervall nach einer Erstinbetriebnahme oder Reinigung gebildet werden. Dieses Verfahren kann auch konstante Änderungen berücksichtigen, ist relativ resistent gegenüber Abweichungen im normalen Betrieb, benötigt dafür aber auch mehrere Reinigungen (und danach mehrere unterschiedliche Durchflüsse) zum "Anlernen" der Funktion f . Es ermöglicht auch Vergleiche zwischen der Qualität von Reinigungen.

Methode 3

[0101] Die nach einer Erstinbetriebnahme oder Reinigung erlernten X -Werte können genutzt werden, um damit für den Durchfluss Wertebereiche zu bilden. Innerhalb eines solchen Bereichs wird jedem Durchflusswert ein erlernter X -Wert zugeordnet. Damit die Übergänge zwischen zwei X -Werten nicht zu abrupt werden, kann dieser X -Wert über die Zeit etwas gefiltert werden.

[0102] Werden nun mit dieser Methode der relative Fouling-Widerstand R_f und X für den Industrie-Wärmetauscher von FIG 2 berechnet und über der Zeit t aufgetragen, ergibt sich ein in FIG 8 gezeigter Verlauf. Zur Vereinfachung wurden zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ vorliegende Anfangswerte $1/k_0$ und X_0 ermittelt und es sind in FIG 5 auf diese Anfangswerte bezogene Werte $1/k'$ und X' dargestellt. Die Berechnung erfolgte mit der Wärmemenge der Produktseite. Senkrechte Linien zeigen dabei wieder die Reinigungszeitpunkte. Wie ersichtlich zeigt auch diese Methode in vielen Bereichen ein zufriedenstellendes Ergebnis.

[0103] Die Zuordnungen der Werte der zweiten Größe zu den Durchflüssen wird hierbei von Vorteil in einem Zeitintervall nach einer Erstinbetriebnahme des Wärmetauschers oder nach einer Reinigung des Wärmetauschers von Fouling ermittelt. Optional können an den Bereichsgrenzen die Übergänge zwischen Werten der zweiten Größe etwas gefiltert

werden, damit sie sich nicht zu stark ändern. Zwischen den verschiedenen erlernten Punkten kann auch interpoliert werden, anstatt zu quantisieren, um einen "sanfteren" Übergang zu erzeugen.

[0104] Eine Optimierungsmöglichkeit stellt hierbei eine so genannte "Stützstellen-Methode" dar. Diese Methode stellt ebenfalls eine Möglichkeit dar, wie die Analyse eines Zusammenhangs zwischen Durchfluss und Referenzwert umgesetzt werden könnte. Hierzu wird eine grobe Vorstellung benötigt, wie die Kennlinie des α -Werts in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit aussehen könnte. Hierbei könnten bereits Randbedingungen für die spätere Kennlinie bzw. Funktion gefunden werden, wie z.B. Monotonie der Kurve. Erste Werte für die Analyse werden im sauberen Zustand nach Reinigungen gewonnen und eingezeichnet.

[0105] Während der Laufzeit kommen neue Werte hinzu. Diese werden gewichtet mit den bisherigen Werten in einem bestimmten Bereich zusammengefasst und die Kennlinie aktualisiert. Der Gewichtungsfaktor kann die Anzahl der bisherigen Punkte in einem Bereich oder der aktuelle Fouling-Widerstand sein.

[0106] Neben den drei Methoden lassen sich auch Kombinationen sowie Erweiterungen anwenden.

Kombination aus Methoden 1 und 2

[0107] Bei dieser Kombination könnte für den Wärmetauscher erst mit Methode 1 der Fouling-Widerstand bzw. der X-Wert bestimmt werden und dann mittelfristig der X-Wert durch ein Verhältnis beider Methoden berechnet werden (abhängig z.B. von der Abweichung zw. Methode 1 und 2, der Varianz von Methode 2 oder der Anzahl der Datenpunkte bei Methode 2). Langfristig sollte dann nur Methode 2 genügen.

Methode 4

[0108] Mithilfe von Methode 1 sind bei Durchflusssprüngen die X-Wertänderungen und die Durchflussänderungen davor und danach bekannt. Es lässt sich nun zum einen die Höhe des Durchflusssprungs (ΔF_1) und des X-Werts (ΔX_1) berechnen. Somit können für jede zukünftige (auch konstante) Durchflussänderung die Auswirkungen relativ zum vorherigen X-Wert berechnet werden. Gibt es mehrere nutzbare Sprünge, wird eine lineare Regression zwischen ΔF_1 und ΔX_1 genutzt. FIG 9 zeigt hierzu eine Zuordnung von Werten für X zum Durchfluss F über der Zeit t.

[0109] Um den endgültigen X-Wert auszurechnen, kann zwischen den verschiedenen Abtastpunkten interpoliert werden, um einen sprungartigen Verlauf zu vermeiden (siehe gestrichelte Linie in FIG 9). Eine Kombination aus Methode 1 und Methode 4 bietet deshalb besondere Vorteile.

Methode 5

[0110] Gemäß einer als Methode 5 bezeichneten Ausgestaltung des Verfahrens wird eine Kennlinie für einen Zusammenhang zwischen der zweiten Größe und dem Durchfluss eines der beiden Medien ermittelt, wobei zur Ermittlung der Kennlinie in einem ersten Schritt eine Kennlinie einer mathematische Ableitung der ersten Größe nach dem Durchfluss des Mediums ermittelt wird und in einem zweiten Schritt die in dem ersten Schritt erhaltene Kennlinie wieder in Bezug auf den Durchfluss des Mediums integriert wird.

[0111] Diese Methode nutzt die Tatsache, dass die das Fouling charakterisierende Größe einem langsamen und halbwegs gleichmäßigen Trend folgt. Der Zusammenhang zwischen der ersten Größe und dem Durchfluss verschiebt sich damit ständig, sodass keine direkte Schätzung des Zusammenhangs möglich ist. Es besteht somit das Problem, eine Kennlinie (statischer Zusammenhang) zwischen zwei Größen zu schätzen. Neben dem statischen Zusammenhang wirkt auf die abhängige Größe dabei zusätzlich ein additiver Trend.

[0112] Grundidee zur Lösung dieses Problems ist, die Ableitung der ersten Größe nach dem Durchfluss (z.B. $(d(1/k)/dF)$) zu schätzen, aus der das Fouling herausgerechnet werden kann. Die Integration der Ableitung liefert dann wieder den eigentlichen Zusammenhang, wobei offensichtlich der Absolutwert verloren geht. Dieser ist jedoch in der Anwendung auch nicht notwendig, da lediglich relative Durchflussänderungen kompensiert werden müssen.

[0113] Angenommen wird, dass sich der reziproke k-Wert aus der Summe des Fouling-Widerstands und X zusammensetzt

$$\frac{1}{k} = X + R_f,$$

wobei X alle weiteren Wärmewiderstände zusammenfasst. Die zeitliche Ableitung liefert

$$\frac{d}{dt} \frac{1}{k} = \frac{dX}{dF} \frac{dF}{dt} + \frac{dR_f}{dt}$$

5

$$\kappa(t) = \frac{dX}{dF} \Phi(t) + m,$$

10 wobei

$$\kappa(t) = \frac{d}{dt} \frac{1}{k}, \quad \Phi(t) = \frac{dF}{dt}, \quad m = \frac{dR_f}{dt}.$$

15

[0114] Somit gilt

$$\frac{dX}{dF} = \frac{\kappa(t) - m}{\Phi(t)}$$

20

[0115] Für

25

$$\Phi_1(t) \neq \Phi_2(t) \text{ gilt } \frac{1}{\Phi_1 - \Phi_2} \left(\Phi_1 \frac{dX}{dF} - \Phi_2 \frac{dX}{dF} \right) = \frac{dX}{dF}$$

30

[0116] An einer Stelle X_0, F_0 gilt der eindeutige aber unbekannte Zusammenhang $\left. \frac{dX}{dF} \right|_{X_0, F_0}$, unabhängig von $\Phi(t)$ und $\kappa(t)$.

[0117] Daher gilt

35

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dF} &= \frac{1}{\Phi_1 - \Phi_2} \left(\Phi_1 \frac{dX}{dF} - \Phi_2 \frac{dX}{dF} \right) = \frac{1}{\Phi_1 - \Phi_2} \left(\Phi_1 \frac{\kappa_1(t) - m}{\Phi_1(t)} - \Phi_2 \frac{\kappa_2(t) - m}{\Phi_2(t)} \right) \\ &= \frac{1}{\Phi_1 - \Phi_2} (\kappa_1(t) - \kappa_2(t)) \end{aligned}$$

40

für alle $\Phi_1(t) \neq \Phi_2(t)$.**[0118]** Es ist also notwendig, für zwei unterschiedliche Durchflussänderungen $\Phi_1(t) \neq \Phi_2(t)$ die damit gewichteteDifferenz der $\frac{1}{k}$ Änderungen zu berechnen.

45

[0119] Um damit nun eine Kennlinie zu bestimmen, wird vorgeschlagen, sukzessive für alle F in der Umgebung eines

F_0 alle Daten mit $\frac{dF}{dt} > c_F$ zu sammeln, und für paarweise $\Phi_1(t) \neq \Phi_2(t)$ jeweils $\frac{dX}{dF}$ zu bestimmen. Durch Aufintegrieren der Ableitungs-Kennlinie wird anschließend die gesuchte Kennlinie erzeugt.

50

[0120] Vorteilhafterweise ist dabei der Absolutwert irrelevant, sodass kein Anfangswert bei der Integration berücksichtigt werden muss.

[0121] Aufgrund der einfacheren Parametrierung wird die Modellierung lediglich qualitativ vorgenommen, also $1/k$ ohne exakte Stoffdaten oder Eigenschaften des Wärmetauschers bestimmt. Damit können lediglich relative Änderungen des k -Werts berechnet werden. Für relative Änderungen der Durchflüsse sind die bestimmten Kennlinien jedoch exakt anwendbar.

55

[0122] Eine Besonderheit dieser Methode ist, dass die eigentliche Aufgabe der Foulingbestimmung zunächst in den Hintergrund tritt und gerade die Foulingauswirkung kompensiert wird, um die X - F -Kennlinie zu schätzen. Erst anschließend wird das Fouling mithilfe der Kennlinie aus $1/k$ bestimmt. Vorteilhafterweise lässt sich eine Kennlinie einfach

implementieren, sodass auch einer Online-Auswertung nichts im Weg steht.

[0123] FIG 10 bis 12 zeigen hierzu eine Simulation eines Industrie-Wärmetauschers bei Variation eines Durchflusses.

[0124] FIG 10 zeigt dabei einen zeitlichen Verlauf von (simulierten) Messwerten des Durchflusses F_P des Produktmediums und des Durchflusses F_S des Servicemediums durch den Wärmetauscher.

5 **[0125]** FIG 11 zeigt die zugehörigen (simulierten) Messwerte für die Temperatur $T_{P, Ein}$ des Produktmediums am Eingang und die Temperatur $T_{P, Aus}$ des Produktmediums am Ausgang des Wärmetauschers. Außerdem sind (simulierte) Messwerte der Temperatur $T_{S, Ein}$ des Servicemediums am Eingang und der Temperatur $T_{S, Aus}$ des Servicemediums am Ausgang des Wärmetauschers gezeigt.

[0126] FIG 12 zeigt die zugehörigen berechneten relativen Werte für $1/k$ und den Fouling-Widerstand R_f .

10 **[0127]** Der $1/k$ -Wert zeigt bei Durchflussänderungen egal auf welcher Seite des Wärmetauschers eine erhebliche Abhängigkeit. Es ist zwar in den idealisierten Daten noch ein überlagerter Trend erkennbar. Je nach Stärke des Foulings ist jedoch keine belastbare Aussage aus dem $1/k$ -Wert alleine abzuleiten.

15 **[0128]** Durch Anwendung der Kennlinien und Kompensation der damit verbundenen Durchflussabhängigkeiten ergibt sich der geschätzte Foulingverlauf (mit Versatz nach oben für eine bessere Sichtbarkeit dargestellt). Bis auf das Messrauschen ist ein linearer Trend erkennbar. Das Fouling kann damit sehr zuverlässig bestimmt werden. Es ist dabei zu beachten, dass zu Beginn beide Durchflüsse unabhängig voneinander verändert wurden, sodass beide Durchflusskennlinien sukzessive auch unabhängig voneinander gut geschätzt werden konnten.

Methode 6

20 **[0129]** Gemäß einer als Methode 6 bezeichneten Ausgestaltung des Verfahrens werden gleichzeitig eine erste Kennlinie für einen Zusammenhang zwischen der zweiten Größe und dem Durchfluss des ersten Mediums und eine zweite Kennlinie für einen Zusammenhang zwischen der zweiten Größe und dem Durchfluss des zweiten Mediums ermittelt, wobei zur Ermittlung der Kennlinien in einem ersten Schritt für jedes des beiden Medien jeweils eine Kennlinie einer mathematischen Ableitung der ersten Größe nach dem Durchfluss des jeweiligen Mediums ermittelt wird und in einem zweiten Schritt die in dem ersten Schritt erhaltenen Kennlinien wieder in Bezug auf den Durchfluss des jeweiligen Mediums integriert werden.

25 **[0130]** Dieses Verfahren ist besonders vorteilhaft bei gleichzeitigen Änderungen der Durchflüsse beider Medien. Hier sind somit zwei Kennlinien (statische Zusammenhänge) zwischen jeweils zwei Größen zu schätzen. Neben den statischen Zusammenhängen wirkt auf die abhängige Größe dabei zusätzlich ein additiver Trend. Angewandt auf den Wärmetauscher überlagern sich die Einflüsse der beiden Kennlinien für die zweite Größe in Abhängigkeit des Durchflusses des jeweiligen Mediums.

30 **[0131]** Im Fall eines Wärmetauschers überlagern sich die Einflüsse der beiden Kennlinien, $X_P = f_P(F_P)$ und $X_S = f_S(F_S)$ auf den $1/k$ -Wert mit

35

$$\frac{1}{k} = X_P + X_S + R_f.$$

40 **[0132]** Die Ableitung von $1/k$ nach der Zeit ergibt

45

$$\frac{d}{dt} \frac{1}{k} = \frac{dX}{dF_P} \frac{dF_P}{dt} + \frac{dX}{dF_S} \frac{dF_S}{dt} + \frac{dR_f}{dt}$$

mit

50

$$X = X_P + X_S .$$

[0133] Es werden nun n_P Stützstellen (dx_{P_i}, F_{P_i}) der Ableitungs-Kennlinie $\frac{dX_P}{dF_P} = \bar{f}_P(F_P)$ und n_S Stützstellen

55 (dx_{S_i}, F_{S_i}) der Ableitungs-Kennlinie $\frac{dX_S}{dF_S} = \bar{f}_S(F_S)$ gesucht.

EP 4 088 077 B1

[0134] Dazu wird für jeden Zeitpunkt t , für den $\frac{dF_P}{dt} > dF_{pLimit}$ oder $\frac{dF_S}{dt} > dF_{sLimit}$ gilt, eine Gleichung mit drei Unbekannten (dx_{Pi}, dx_{Si}, m) erzeugt:

$$\frac{d\frac{1}{k}}{dt} = dx_{Pi} \frac{dF_P}{dt} + dx_{Si} \frac{dF_S}{dt} + m$$

[0135] n_D Gleichungen lassen sich dann in Matrixschreibweise zusammenfassen, wobei der jeweilige Durchfluss bei den Stützstellen beachtet werden muss. Damit gilt

$$A b = c$$

$$b = \left[\frac{dX_P}{dF_P} |_{F_{P1}}, \dots, \frac{dX_P}{dF_P} |_{F_{Pn_p}}, \frac{dX_S}{dF_S} |_{F_{S1}}, \dots, \frac{dX_S}{dF_S} |_{F_{Sn_s}}, m \right]^T$$

$$c = [\kappa(t_1) \dots \kappa(t_m)]$$

$$A \in R^{n_D \times (n_p+n_s+1)}$$

[0136] Zum besseren Verständnis wird eine Zeile von A angegeben. Zum entsprechenden Zeitpunkt soll $F_P \approx F_{P5}$ und $F_S \approx F_{S7}$, wobei $n_p = 10$ und $n_s = 20$. Die Zeile von A entspricht dann

$$\left[0, \dots, 0, \frac{dX_P}{dF_P} |_{F_{P5}}, 0, \dots, 0, \frac{dX_S}{dF_S} |_{F_{S7}}, 0, \dots, 0, 1 \right]^T$$

wobei sich nur in der 5. und 17. (=10+7) sowie letzten Spalte von null verschiedene Einträge befinden.

[0137] Decken die vorhandenen Messwerte nun alle Durchflussbereiche auf Service- und Produktseite ab, so steht in jeder Spalte von A zumindest ein Datenpunkt. Unter der Annahme, dass A den maximalen Rang besitzt, lässt sich das Gleichungssystem nach den Unbekannten im Vektor b auflösen, beispielsweise mittels Pseudoinverse.

[0138] Aus dem Vektor b können dann wieder die beiden Ableitungskennlinien erzeugt werden und durch Integration dieser ergeben sich die Kennlinien $X_P = f_P(F_P)$ und $X_S = f_S(F_S)$.

[0139] Sind beide Kennlinien vorhanden, so lässt sich das Fouling abschätzen, indem zuerst $\frac{1}{k}$ bestimmt wird und durch Anwendung der Kennlinien

$$R_f = \frac{1}{k} - X_P - X_S$$

das Fouling berechnet wird.

[0140] Wie bereits kurz skizziert, sind die Absolutwerte der Kennlinien durch die Integration unbekannt. Aufgrund der einfacheren Parametrierung wird ohnehin die Modellierung lediglich qualitativ vorgenommen, also $1/k$ ohne exakte Stoffdaten oder Eigenschaften des Wärmetauschers bestimmt. Damit können lediglich relative Änderungen des k-Werts berechnet werden. Für relative Änderungen der Durchflüsse sind die bestimmten Kennlinien jedoch exakt anwendbar.

[0141] Auch hier tritt die eigentliche Aufgabe der Foulingbestimmung zunächst in den Hintergrund und gerade die Foulingauswirkung wird kompensiert, um die beiden X-F-Kennlinien zu schätzen. Erst anschließend wird das Fouling mithilfe der Kennlinien aus $1/k$ bestimmt. Vorteilhafterweise lassen sich Kennlinien einfach implementieren, sodass auch

einer Online-Auswertung nichts im Weg steht.

[0142] FIG 13 - 15 zeigen hierzu eine Simulation eines Industrie-Wärmetauschers bei Variation der Durchflüsse.

[0143] FIG 13 zeigt dabei einen zeitlichen Verlauf von (simulierten) Messwerten des Durchflusses F_P des Produktmediums und des Durchflusses F_S des Servicemediums durch den Wärmetauscher.

[0144] FIG 14 zeigt die zugehörigen (simulierten) Messwerte für die Temperatur $T_{P, Ein}$ des Produktmediums am Eingang und die Temperatur $T_{P, Aus}$ des Produktmediums am Ausgang des Wärmetauschers. Außerdem sind (simulierte) Messwerte der Temperatur $T_{S, Ein}$ des Servicemediums am Eingang und der Temperatur $T_{S, Aus}$ des Servicemediums am Ausgang des Wärmetauschers gezeigt.

[0145] FIG 15 zeigt die daraus berechneten relativen Werte für $1/k$ und den Fouling-Widerstand R_f .

[0146] Der $1/k$ -Wert zeigt bei Durchflussänderungen, egal auf welcher Seite des Wärmetauschers, eine erhebliche Abhängigkeit. Es ist zwar in den idealisierten Daten noch ein überlagerter Trend erkennbar. Je nach Stärke des Foulings ist jedoch keine belastbare Aussage aus dem $1/k$ -Wert alleine abzuleiten. Durch Anwendung der Kennlinien und Kompensation der damit verbundenen Durchflussabhängigkeiten ergibt sich der geschätzte Foulingverlauf R_f . Bis auf das Messrauschen ist ein linearer Trend erkennbar. Das Fouling kann damit sehr zuverlässig bestimmt werden, auch wenn sich beide Durchflüsse gleichzeitig ändern.

[0147] Dieselben Methoden lassen sich grundsätzlich auch auf die Betrachtung der Druckdifferenz übertragen. Auch der Strömungswiderstand erhöht sich bei Fouling, hängt aber auch vom Durchfluss ab.

[0148] Die Methoden ermöglichen auch bei einer Durchflussänderung für verschiedene Wärmetauscher eine zuverlässige Quantifizierung des Fouling-Widerstands. Dabei ist kein Wissen über Stoffeigenschaften oder bauliche Eigenschaften des Wärmetauschers notwendig. Die Methoden funktionieren alle rein datenbasiert. Bisher wird nur der reine k -Wert als Indikator für Fouling verwendet. Diese Methoden nutzen diese Größe und binden gleichzeitig den Einfluss der Strömungsdynamik der beiden Medien auf das Endergebnis mit ein.

[0149] Es wird zudem kein Modell des Wärmetauschers benötigt, das von einem Experten aufwendig angefertigt werden müsste. Alle Ergebnisse und Zwischenschritte lassen sich zudem in 2D- oder 3D- Kennfeldern darstellen. Es werden keine unanschaulichen mehrdimensionalen Kennfelder zur Berechnung benötigt. Zudem kann auf eine der Messungen F_P , F_S , $T_{P, Ein}$, $T_{P, Aus}$, $T_{S, Ein}$, $T_{S, Aus}$ auch verzichtet werden, sodass keine vollständige Instrumentierung vorausgesetzt wird. Wenn eine Kompensation in Bezug auf Durchflussänderungen beider Medien erfolgt, kann dabei natürlich nur auf eine Temperaturmessung verzichtet werden.

[0150] Mit diesen Methoden konnte am Beispiel eines Industrie-Wärmetauschers ein deutlich besseres Ergebnis bei der Ermittlung von Fouling erzielt werden, als mit der konventionellen Berechnung. Die Ergebnisse könnten damit einen Anlagenfahrer zu einer deutlich besseren Bewertung des Fouling-Widerstandes verhelfen. Vorteilhafterweise können die Methoden nicht auf die Wärmebilanzen angewandt werden, sondern auch auf die Betrachtung der Druckdifferenzen und damit der Strömungswiderstände.

[0151] Das erfindungsgemäße Verfahren kann als stand-alone-Anwendung in einer Prozessanlage bereitgestellt werden oder in ein Prozessleitsystem einer Prozessanlage integriert werden. Es kann auch in einem lokalen oder entfernten Rechnersystem ("Cloud") bereitgestellt werden, z.B. von einem Service-Anbieter als "Software as a Service".

[0152] Eine in FIG 1 beispielhaft gezeigte erfindungsgemäße Vorrichtung 10 zur Ermittlung von Fouling umfasst

- eine Einrichtung 20 zum Empfang der Messwerte $T_{P, Ein}$, $T_{P, Aus}$, $T_{S, Ein}$, $T_{S, Aus}$, F_P , F_S des Wärmetauschers 1 und
- eine Auswerteeinrichtung 30, die eingerichtet ist, mittels eines vorstehend beschriebenen Verfahrens aus diesen Messwerten einen Wert für den Fouling-Widerstand R_f zu ermitteln und auszugeben. Zusätzlich oder alternativ kann die Auswerteeinrichtung auch als Überwachungsvorrichtung fungieren: sie kann den ermittelten Fouling-Widerstand auf Überschreiten eines Schwellwertes überwachen und bei Überschreiten ein Signal ausgeben, das beispielsweise eine Notwendigkeit einer Reinigung signalisiert.

[0153] Die Auswerteeinrichtung 30 umfasst hierzu eine Prozessoreinheit 31, einen Speicher 32 zur Abspeicherung der empfangenen Messdaten, und einen Speicher 33, in dem ein Programm 34 mit Anweisungen gespeichert ist, bei deren Ausführung mittels der Prozessoreinheit 31 eines der vorstehend beschriebenen Verfahren ausgeführt wird. Die Prozessoreinheit 31 speichert die von der Einrichtung 20 empfangenen Messwerte M in dem Speicher 32.

[0154] Eine Erfassung weiterer Größen wie beispielsweise A , $c_{P, P}$, $c_{P, S}$, ρ_P , ρ_S , ist nicht notwendig. Das erfindungsgemäße Verfahren geht vielmehr davon aus, dass diese nicht bekannt sind. Es können beliebige Konstanten angenommen werden, die dann zwar zu einem absolut gesehen falschen k -Wert führen werden, aber letztendlich sind die relativen Änderungen dieses k -wertes ausschlaggebend für die Funktionsweise und den Erfolg des Verfahrens.

[0155] Die in FIG 1 gezeigte Vorrichtung 10 kann beispielsweise als stand-alone-Anwendung in einer Prozessanlage bereitgestellt werden oder in ein Prozessleitsystem einer Prozessanlage integriert werden.

[0156] Eine in FIG 16 gezeigte Vorrichtung 100 zur Ermittlung von Fouling kann dagegen durch ein lokales oder entferntes Rechnersystem ("Cloud") bereitgestellt werden, z.B. um die Ermittlung von Fouling durch einen Service-Anbieter als "Software as a Service" anzubieten. Die Empfangseinrichtung 20 befindet sich dabei vor Ort in der Pro-

zessanlage des Wärmetauschers 1 und die Auswerteeinrichtung 30 befindet sich auf einem lokalen oder entfernten Rechnersystem ("Cloud"). Die Empfangseinrichtung 20 speichert hierzu die empfangenen Messwerte in einem Speicher 21 und sendet (z.B. in regelmäßigen zeitlichen Abständen, ereignisgesteuert oder nach Aufforderung durch die Auswerteeinrichtung 30) die Messwerte M (oder daraus abgeleitete Größen) mittels einer Sendeeinrichtung 22, z.B. über das Internet oder ein Intranet, an die Auswerteeinrichtung 30.

[0157] Die Auswerteeinrichtung 30 umfasst eine Prozessoreinheit 31, einen Speicher 32 zur Abspeicherung der empfangenen Messdaten, und einen Speicher 33, in dem ein Programm 34 mit Anweisungen gespeichert ist, bei deren Ausführung mittels der Prozessoreinheit 31 eines der vorstehend beschriebenen Verfahren ausgeführt wird.

[0158] Die Prozessoreinheit 31 speichert die von der Einrichtung 20 über eine Schnittstelle 36 empfangenen Messwerte M in dem Speicher 32, sowie ggf. für weitere Eingangsgrößen, die über eine separate Schnittstelle 37 empfangen werden. Die mit dem Programm 34 ermittelten Werte der für den Fouling-Widerstand R_f und/oder ein Signal, welches eine Notwendigkeit einer Reinigung signalisiert, werden über eine Schnittstelle 38 ausgegeben. Die Schnittstellen 36, 37 und 38 können dabei auch durch eine einzige gemeinsame Schnittstelle, zum Beispiel zum Intranet oder einem Intranet, bereitgestellt sein.

[0159] Durch eine nahezu Echtzeiterfassung der Messwerte und Berechnung des Fouling-Widerstandes kann eine kontinuierliche laufende datenbasierte Fouling-Analyse und Überwachung des Fouling begleitend zum Betrieb der Anlage bzw. des Wärmetauschers erfolgen. Es ist aber auch eine offline-Fouling-Analyse mit einem Zeitversatz zum realen Betrieb der Anlage möglich.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung von Fouling bei einem Wärmetauscher (1), bei dem Wärme von einem ersten Medium (S) zu einem zweiten Medium (P) übertragen wird, wobei ein Wert für eine das Fouling charakterisierende Größe (R_f) aus einem Wert für eine vom dem Fouling beeinflussten ersten Größe (k) und einem Wert einer zweiten Größe (X) ermittelt wird, wobei eine durch eine Änderung eines Durchflusses (F_S , F_P) des ersten Mediums (S) und/oder des zweiten Mediums (P) durch den Wärmetauscher (1) bewirkte Änderung der ersten Größe (k) von der zweiten Größe (X) zumindest teilweise kompensiert wird, wobei die erste Größe (k) ein Wärmedurchgangswiderstand oder eine Wärmedurchgangsfähigkeit (bzw. ein Wärmedurchgangskoeffizient (k-Wert)) ist, und wobei die erste Größe (k) und die zweite Größe (X) aus Messwerten von mehreren der folgenden Messgrößen

- Temperaturen ($T_{P, Ein}$, $T_{P, Aus}$, $T_{S, Ein}$, $T_{S, Aus}$) des ersten Mediums (S) und des zweiten Mediums (P) am Eingang und am Ausgang des Wärmetauschers (1) und

- Durchflüsse (F_P , F_S) des ersten Mediums (S) und des zweiten Mediums (P) durch den Wärmetauscher (1) ermittelt wird

dadurch gekennzeichnet, dass bei der Ermittlung der ersten und der zweiten Größe weder Stoffeigenschaften des ersten Mediums (S) und des zweiten Mediums (P) noch bauliche Eigenschaften des Wärmetauschers (1) verwendet werden.

2. Verfahren zur Ermittlung von Fouling bei einem Wärmetauscher (1), bei dem Wärme von einem ersten Medium (S) zu einem zweiten Medium (P) übertragen wird, wobei ein Wert für eine das Fouling charakterisierende Größe (R_f) aus einem Wert für eine vom dem Fouling beeinflussten ersten Größe (k) und einem Wert einer zweiten Größe (X) ermittelt wird, wobei eine durch eine Änderung eines Durchflusses (F_S , F_P) des ersten Mediums (S) und/oder des zweiten Mediums (P) durch den Wärmetauscher (1) bewirkte Änderung der ersten Größe (k) von der zweiten Größe (X) zumindest teilweise kompensiert wird, wobei die erste Größe ein Strömungswiderstand ist, und wobei die erste Größe (k) und die zweite Größe (X) aus Messwerten von mehreren der folgenden Messgrößen

- Drücke des ersten Mediums (S) und des zweiten Mediums (P) am Eingang und am Ausgang des Wärmetauschers (1) und

- Durchflüsse (F_P , F_S) des ersten Mediums (S) und des zweiten Mediums (P) durch den Wärmetauscher (1) ermittelt wird **dadurch gekennzeichnet, dass** bei der Ermittlung der ersten und der zweiten Größe weder Stoffeigenschaften des ersten Mediums (S) und des zweiten Mediums (P) noch bauliche Eigenschaften des Wärmetauschers (1) verwendet werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei im Zeitpunkt (t_0) einer Durchflussänderung der Wert der zweiten Größe (X) derart geändert wird, dass der Wert der das Fouling charakterisierenden Größe (R_f) konstant bleibt.

EP 4 088 077 B1

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei nach einer Erstinbetriebnahme und jeweils nach einer Reinigung des Wärmetauschers (1) ein Anfangswert (k_0) der ersten Größe (k) ermittelt wird und der Wert der zweiten Größe (X) auf einen Anfangswert (X_0) gesetzt wird, der dem Anfangswert (k_0) der ersten Größe (k) entspricht.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei eine Funktion (f) definiert ist, die einem Wert für einen Durchfluss des ersten Mediums (S) und/oder des zweiten Mediums (P) jeweils einen Wert für die zweite Größe (X) zuordnet.
6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei die Funktion (f) in einem Zeitintervall (T) nach einer Erstinbetriebnahme oder nach einer Reinigung des Wärmetauschers (1) von Fouling ermittelt wird.
7. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, wobei die Funktion (f) durch eine Regression, insbesondere eine lineare oder eine 3D-Regression, von Messwerten des Durchflusses (F) und zugehörigen Werten der zweiten Größe (X) in dem Zeitintervall (T) gebildet wird.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei Wertebereiche für den Durchfluss (F) definiert sind, denen jeweils ein Wert für die zweite Größe (X) zugeordnet ist.
9. Verfahren nach Anspruch 8, wobei die Zuordnungen der Werte der zweiten Größe (X) zu dem Durchfluss (F) in einem Zeitintervall (T) nach einer Erstinbetriebnahme oder nach einer Reinigung des Wärmetauschers (1) von Fouling ermittelt werden.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei eine Kennlinie für einen Zusammenhang zwischen der zweiten Größe (X) und dem Durchfluss (F) eines der beiden Medien (S , P) ermittelt wird, wobei zur Ermittlung der Kennlinie in einem ersten Schritt eine Kennlinie einer mathematische Ableitung der ersten Größe (k) nach dem Durchfluss (F) des Mediums (S bzw. P) ermittelt wird und in einem zweiten Schritt die in dem ersten Schritt erhaltene Kennlinie wieder in Bezug auf den Durchfluss (F) des Mediums (S bzw. P) integriert wird.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei gleichzeitig eine erste Kennlinie für einen Zusammenhang zwischen der zweiten Größe (X) und dem Durchfluss (F) des ersten Mediums (S bzw. P) und eine zweite Kennlinie für einen Zusammenhang zwischen der zweiten Größe (X) und dem Durchfluss (F) des zweiten Mediums (P bzw. S) ermittelt wird, wobei zur Ermittlung der Kennlinien in einem ersten Schritt für jedes der beiden Medien (S , P) jeweils eine Kennlinie einer mathematische Ableitung der ersten Größe (k) nach dem Durchfluss (F) des jeweiligen Mediums (S bzw. P) ermittelt wird und in einem zweiten Schritt die in dem ersten Schritt erhaltenen Kennlinien wieder in Bezug auf den Durchfluss (F) des jeweiligen Mediums (S bzw. P) integriert werden.
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die das Fouling charakterisierende Größe (R_f) ein Wärmedurchgangswiderstand ist.
13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei nur relative Änderungen der das Fouling charakterisierende Größe (R_f), der ersten Größe (k) und der zweiten Größe (X) ermittelt werden.
14. Vorrichtung (10, 100) zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 und 3 bis 13, umfassend
 - eine Einrichtung (20) zum Empfang von Messwerten (M) oder daraus abgeleiteten Größen des Wärmetauschers (1) und
 - eine Auswerteeinrichtung (30), die eingerichtet ist, aus den Messwerten (M) oder den abgeleiteten Größen einen Wert für eine das Fouling charakterisierende Größe (R_f) aus einem Wert für eine von dem Fouling beeinflussten ersten Größe (k) und einem Wert einer zweiten Größe (X) zu ermitteln, wobei eine durch eine Änderung eines Durchflusses (F_S , F_P) des ersten Mediums (S) und/oder des zweiten Mediums (P) durch den Wärmetauscher (1) bewirkte Änderung der ersten Größe (k) von der zweiten Größe (X) zumindest teilweise kompensiert wird, und wobei die erste Größe (k) und die zweite Größe (X) aus Messwerten von mehreren der folgenden Messgrößen
 - Temperaturen ($T_{P, Ein}$, $T_{P, Aus}$, $T_{S, Ein}$, $T_{S, Aus}$) des ersten Mediums (S) und des zweiten Mediums (P) am Eingang und am Ausgang des Wärmetauschers (1) und
 - Durchflüsse (F_P , F_S) des ersten Mediums (S) und des zweiten Mediums (P) durch den Wärmetauscher (1)

ermittelt wird und ohne dass bei der Ermittlung der ersten und der zweiten Größe Stoffeigenschaften des ersten

Mediums (S) und des zweiten Mediums (P) und bauliche Eigenschaften des Wärmetauschers (1) verwendet werden.

15. Vorrichtung (10, 100) zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 2 bis 13, umfassend

- 5 - eine Einrichtung (20) zum Empfang von Messwerten (M) oder daraus abgeleiteten Größen des Wärmetauschers (1) und
- eine Auswerteeinrichtung (30), die eingerichtet ist, aus den Messwerten (M) oder den abgeleiteten Größen einen Wert für eine das Fouling charakterisierende Größe (R_f) aus einem Wert für eine von dem Fouling beeinflussten ersten Größe (k) und einem Wert einer zweiten Größe (X) zu ermitteln, wobei eine durch eine Änderung eines Durchflusses (F_S , F_P) des ersten Mediums (S) und/oder des zweiten Mediums (P) durch den Wärmetauscher (1) bewirkte Änderung der ersten Größe (k) von der zweiten Größe (X) zumindest teilweise kompensiert wird, wobei die erste Größe ein Strömungswiderstand ist, und wobei die erste Größe (k) und die zweite Größe (X) aus Messwerten von mehreren der folgenden Messgrößen
- 10 - Drücke des ersten Mediums (S) und des zweiten Mediums (P) am Eingang und am Ausgang des Wärmetauschers (1) und
- 15 - Durchflüsse (F_P , F_S) des ersten Mediums (S) und des zweiten Mediums (P) durch den Wärmetauscher (1)

ermittelt wird und ohne dass bei der Ermittlung der ersten und der zweiten Größe Stoffeigenschaften des ersten Mediums (S) und des zweiten Mediums (P) und bauliche Eigenschaften des Wärmetauschers (1) verwendet werden.

16. Computer-Programm umfassend Anweisungen die, wenn das Programm auf einem Computer ausgeführt wird, den Computer veranlassen, das Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13 auszuführen.

25 **Claims**

1. Method for determining fouling in a heat exchanger (1), in which heat from a first medium (S) is transferred to a second medium (P),

30 wherein a value for a variable characterising the fouling (R_f) is determined from a value for a first variable (k) affected by the fouling and from a value of a second variable (X), wherein a change in the first variable (k) caused by a change in a flow (F_S , F_P) of the first medium (S) and/or of the second medium (P) through the heat exchanger (1) is compensated for at least in part by the second variable (X), wherein the first variable (k) is a thermal transmission resistance or a thermal transmittance (or a thermal transmission coefficient (k value)), and wherein the first variable (k) and the second variable (X) is determined from measured values of a plurality of the following measured variables

- 35 - temperatures ($T_{P,In}$, $T_{P,Out}$, $T_{S,In}$, $T_{S,Out}$) of the first medium (S) and of the second medium (P) at the inlet and at the outlet of the heat exchanger (1) and
- 40 - flows (F_P , F_S) of the first medium (S) and of the second medium (P) through the heat exchanger (1),

characterised in that neither material properties of the first medium (S) and of the second medium (P) nor structural properties of the heat exchanger (1) are used in the determination of the first and the second variable.

45 2. Method for determining fouling in a heat exchanger (1), in which heat is transferred from a first medium (S) to a second medium (P),

50 wherein a value for a variable characterising the fouling (R_f) is determined from a value for a first variable (k) affected by the fouling and from a value of a second variable (X), wherein a change in the first variable (k) caused by a change in a flow (F_S , F_P) of the first medium (S) and/or of the second medium (P) through the heat exchanger (1) is compensated for at least in part by the second variable (X), wherein the first variable is a flow resistance, and wherein the first variable (k) and the second variable (X) is determined from measured values of a plurality of the following measured variables

- 55 - pressures of the first medium (S) and of the second medium (P) at the inlet and at the outlet of the heat exchanger (1) and
- flows (F_P , F_S) of the first medium (S) and of the second medium (P) through the heat exchanger (1),

characterised in that neither material properties of the first medium (S) and of the second medium (P) nor structural properties of the heat exchanger (1) are used in the determination of the first and the second variable.

3. Method according to claim 1 or 2, wherein at the time (t_0) of a change in flow the value of the second variable (X) is changed such that the value of the variable characterising the fouling (R_f) remains constant.
4. Method according to claim 3, wherein after an initial startup and after a cleaning operation of the heat exchanger (1) an initial value (k_0) of the first variable (k) is determined in each case and the value of the second variable (X) is set to an initial value (X_0) that corresponds to the initial value (k_0) of the first variable (k).
5. Method according to one of the preceding claims, wherein a function (f) is defined which in each case assigns a value for the second variable (X) to a value for a flow of the first medium (S) and/or of the second medium (P).
6. Method according to claim 5, wherein the function (f) is determined in a time interval (T) after an initial startup or after cleaning the heat exchanger (1) of fouling.
7. Method according to claim 5 or 6, wherein the function (f) is formed by a regression, in particular a linear or a 3D regression, of measured values of the flow (F) and associated values of the second variable (X) in the time interval (T).
8. Method according to one of the preceding claims, wherein value ranges for the flow (F) are defined, to each of which a value for the second variable (X) is assigned.
9. Method according to claim 8, wherein the assignments of the values of the second variable (X) to the flow (F) are determined in a time interval (T) after an initial startup or after cleaning the heat exchanger (1) of fouling.
10. Method according to one of the preceding claims, wherein a characteristic curve for a relationship between the second variable (X) and the flow (F) of one of the two media (S, P) is determined, wherein for the determination of the characteristic curve in a first step a characteristic curve of a mathematical derivation of the first variable (k) after the flow (F) of the medium (S or P) is determined and in a second step the characteristic curve obtained in the first step is integrated again in respect of the flow (F) of the medium (S or P).
11. Method according to one of the preceding claims, wherein simultaneously a first characteristic curve for a relationship between the second variable (X) and the flow (F) of the first medium (S or P) and a second characteristic curve for a relationship between the second variable (X) and the flow (F) of the second medium (P or S) is determined, wherein for the determination of the characteristic curves in a first step for each of the two media (S, P) in each case a characteristic curve of a mathematical derivation of the first variable (k) after the flow (F) of the respective medium (S or P) is determined and in a second step the characteristic curves obtained in the first step are again integrated in respect of the flow (F) of the respective medium (S or P).
12. Method according to one of the preceding claims, wherein the variable characterising the fouling (R_f) is a thermal transmission resistance.
13. Method according to one of the preceding claims, wherein only relative changes in the variable characterising the fouling (R_f), the first variable (k) and the second variable (X) are determined.
14. Device (10, 100) for the performance of the method according to one of claims 1 and 3 to 13, comprising
 - a device (20) for receiving measured values (M) or variables derived therefrom of the heat exchanger (1) and
 - an evaluation device (30) which is designed to determine from the measured values (M) or the derived variables a value for a variable characterising the fouling (R_f) from a value for a first variable (k) affected by the fouling and from a value of a second variable (X), wherein a change in the first variable (k) caused by a change in a flow (F_S , F_P) of the first medium (S) and/or of the second medium (P) through the heat exchanger (1) is compensated for at least in part by the second variable (X), and wherein the first variable (k) and the second variable (X) are determined from measured values of a plurality of the following measured variables
 - temperatures ($T_{P,In}$, $T_{P,Out}$, $T_{S,In}$, $T_{S,Out}$) of the first medium (S) and of the second medium (P) at the inlet and at the outlet of the heat exchanger (1) and
 - flows (F_P , F_S) of the first medium (S) and of the second medium (P) through the heat exchanger (1)

and without material properties of the first medium (S) and of the second medium (P) and structural properties of the heat exchanger (1) being used during the determination of the first and the second variable.

15. Device (10, 100) for the performance of the method according to one of claims 2 to 13, comprising

- a device (20) for receiving measured values (M) or variables derived therefrom of the heat exchanger (1) and
- an evaluation device (30) which is designed to determine from the measured values (M) or the derived variables a value for a variable characterising the fouling (R_f) from a value for a first variable (k) affected by the fouling and from a value of a second variable (X), wherein a change in the first variable (k) caused by a change in a flow (F_S , F_P) of the first medium (S) and/or of the second medium (P) through the heat exchanger (1) is compensated for at least in part by the second variable (X), wherein the first variable is a flow resistance, and wherein the first variable (k) and the second variable (X) is determined from measured values of a plurality of the following measured variables
 - pressures of the first medium (S) and of the second medium (P) at the inlet and at the outlet of the heat exchanger (1) and
 - flows (F_P , F_S) of the first medium (S) and of the second medium (P) through the heat exchanger (1)

and without material properties of the first medium (S) and of the second medium (P) and structural properties of the heat exchanger (1) being used during the determination of the first and the second variable.

16. Computer program comprising instructions which, when the program is executed on a computer, cause the computer to execute the method according to one of claims 1 to 13.

Revendications

1. Procédé de détermination de l'encrassement dans un échangeur de chaleur (1), dans lequel on transmet de la chaleur d'un premier milieu (S) à un deuxième milieu (P),

dans lequel on détermine une valeur d'une grandeur (R_f) caractérisant l'encrassement, à partir d'une valeur d'une première grandeur (k) influencée par l'encrassement et d'une valeur d'une deuxième grandeur (X), dans lequel on compense, au moins en partie par la deuxième grandeur (X), une variation de la première grandeur (k), provoquée par une variation du débit (F_S , F_P) du premier milieu (S) et/ou du deuxième milieu (P) dans l'échangeur de chaleur (1), dans lequel la première grandeur (k) est une résistance au passage de la chaleur ou une conductibilité au passage de la chaleur (respectivement un coefficient de passage de la chaleur (valeur k)) et dans lequel on détermine la première grandeur (k) et la deuxième grandeur (X) à partir de valeurs de mesure de plusieurs des grandeurs de mesure suivantes :

- des températures ($T_{P,Ein}$, $T_{P,Aus}$, $T_{S,Ein}$, $T_{S,Aus}$) du premier milieu (S) et du deuxième milieu (P) à l'entrée et à la sortie de l'échangeur de chaleur (1) et
- des débits (F_P , F_S) du premier milieu (S) et du deuxième milieu (P) dans l'échangeur de chaleur (1),

caractérisé en ce que, lors de la détermination de la première et de la deuxième grandeurs, on n'utilise ni des propriétés de matière du premier milieu (S) et du deuxième milieu (P), ni des propriétés de construction de l'échangeur de chaleur (1).

2. Procédé de détermination de l'encrassement dans un échangeur de chaleur (1), dans lequel on transmet de la chaleur d'un premier milieu (S) à un deuxième milieu (P),

dans lequel on détermine une valeur d'une grandeur (R_f) caractérisant l'encrassement, à partir d'une valeur d'une première grandeur (k) influencée par l'encrassement et d'une valeur d'une deuxième grandeur (X), dans lequel on compense, au moins en partie par la deuxième grandeur (X), une variation de la première grandeur (k), provoquée par une variation du débit (F_S , F_P) du premier milieu (S) et/ou du deuxième milieu (P) dans l'échangeur de chaleur (1), dans lequel la première grandeur est une résistance à l'écoulement et dans lequel on détermine la première grandeur (k) et la deuxième grandeur (X) à partir de valeurs de mesure de plusieurs des grandeurs de mesure suivantes :

- des pressions du premier milieu (S) et du deuxième milieu (P) à l'entrée et à la sortie de l'échangeur de chaleur (1),

- des débits (F_P , F_S) du premier milieu (S) et du deuxième milieu (P) dans l'échangeur de chaleur (1), **caractérisé en ce que**, lors de la détermination de la première et de la deuxième grandeurs, on n'utilise ni des propriétés de matière du premier milieu (S) et du deuxième milieu (P), ni des propriétés de construction de l'échangeur de chaleur (1).

- 5
3. Procédé suivant la revendication 1 ou 2, dans lequel, à l'instant (t_0) d'une variation de débit, on fait varier la valeur de la deuxième grandeur (X), de manière à ce que la valeur de la grandeur (R_f) caractérisant l'encrassement reste constante.
- 10
4. Procédé suivant la revendication 3, dans lequel, après une première mise en fonctionnement et respectivement après un nettoyage de l'échangeur de chaleur (1), on détermine une valeur (k_0) initiale de la première grandeur (k) et on règle la valeur de la deuxième grandeur (X) à une valeur (X_0) initiale, qui correspond à la valeur (k_0) initiale de la première grandeur (k).
- 15
5. Procédé suivant l'une des revendications précédentes, dans lequel il est défini une fonction (f), qui a une valeur d'un débit du premier milieu (S) et/ou du deuxième milieu (P) associée respectivement à une valeur de la deuxième grandeur (X).
- 20
6. Procédé suivant la revendication 5, dans lequel on détermine la fonction (f) dans un intervalle (T) de temps, après une première mise en fonction ou après un nettoyage de l'échangeur de chaleur (1) pour en supprimer l'encrassement.
- 25
7. Procédé suivant la revendication 5 ou 6, dans lequel on forme la fonction (f) par une régression, en particulier par une régression linéaire ou en 3D, de valeurs de mesure associées du débit (F) et de valeurs associées de la deuxième grandeur (X) dans l'intervalle (T) de temps.
- 30
8. Procédé suivant l'une des revendications précédentes, dans lequel des plages de valeurs du débit (F) sont définies, auxquelles est associée respectivement une valeur de la deuxième grandeur (X) .
- 35
9. Procédé suivant la revendication 8, dans lequel on détermine les associations des valeurs de la deuxième grandeur (X) au débit (F) dans un intervalle (T) de temps, après une première mise e fonctionnement ou après un nettoyage de l'échangeur de chaleur (1) pour en supprimer l'encrassement.
- 40
10. Procédé suivant l'une des revendications précédentes, dans lequel on détermine une courbe caractéristique d'une relation entre la deuxième grandeur (X) et le débit (F) de l'un des deux milieux (S, P), dans lequel, pour la détermination de la courbe caractéristique, on détermine, dans un premier stade, une courbe caractéristique d'une dérivée mathématique de la première grandeur (k) en fonction du débit (F) du milieu (S ou P) et, dans un deuxième stade, on intègre la courbe caractéristique obtenue dans le premier stade à nouveau par rapport au débit (F) du milieu (S ou P).
- 45
11. Procédé suivant l'une des revendications précédentes, dans lequel on détermine, en même temps, une première courbe caractéristique d'une relation entre la deuxième grandeur (X) et le débit (F) du premier milieu (S ou P) et une deuxième courbe caractéristique d'une relation entre la deuxième grandeur (X) et le débit (F) du deuxième milieu (P ou S), dans lequel, pour la détermination des courbes caractéristiques, on détermine, dans un premier stade pour chacun des deux milieux (S, P) respectivement une courbe caractéristique d'une dérivée mathématique de la première grandeur (k) en fonction du débit (F) du milieu (S ou P) respectif et, dans un deuxième stade, on intègre les courbes caractéristiques obtenues dans le premier stade à nouveau en fonction du débit (F) du milieu (S ou P) respectif.
- 50
12. Procédé suivant l'une des revendications précédentes, dans lequel la grandeur (R_f) caractérisant l'encrassement est une résistance au passage de la chaleur.
- 55
13. Procédé suivant l'une des revendications précédentes, dans lequel on ne détermine que des variations relatives de la grandeur (R_f) caractérisant l'encrassement, de la première grandeur (k) et de la deuxième grandeur (X).
14. Installation (10, 100) pour effectuer le procédé suivant l'une des revendications 1 et 3 à 13, comprenant
- un dispositif (20) de réception de valeurs (M) de mesure ou de grandeurs, qui s'en déduisent, de l'échangeur de chaleur (1), et

- un dispositif (30) d'analyse, qui est agencé pour déterminer, à partir des valeurs (M) de mesure ou des grandeurs, qui s'en déduisent, une valeur d'une grandeur (R_f) caractérisant l'encrassement, à partir d'une valeur d'une première grandeur (k) influençant l'encrassement et d'une valeur d'une deuxième grandeur (X), dans lequel on compense au moins en partie, par la deuxième grandeur (X), une variation de la première grandeur (k) provoquée par une variation d'un débit (F_S, F_P) du premier milieu (S) et/ou du deuxième milieu (P) dans l'échangeur de chaleur (1), et dans lequel on détermine la première grandeur (k) et la deuxième grandeur (X), à partir de valeurs de mesure de plusieurs des grandeurs de mesure suivantes

- des températures ($T_{P,Ein}, T_{P,Aus}, T_{S,Ein}, T_{S,Aus}$) du premier milieu (S) et du deuxième milieu (P) à l'entrée et à la sortie de l'échangeur de chaleur (1), et

- des débits (F_P, F_S) du premier milieu (S) et du deuxième milieu (P) dans l'échangeur de chaleur (1),

et sans utiliser, lors de la détermination de la première et de la deuxième grandeurs, des propriétés de matière du premier milieu (S) et du deuxième milieu (P) et des propriétés de construction de l'échangeur de chaleur (1).

15. Installation (10, 100) pour effectuer le procédé suivant l'une des revendications 2 à 13, comprenant

- un dispositif (20) de réception de valeurs (M) de mesure ou de grandeurs, qui s'en déduisent, de l'échangeur de chaleur (1), et

- un dispositif (30) d'analyse, qui est agencé pour déterminer, à partir des valeurs (M) de mesure ou des grandeurs, qui s'en déduisent, une valeur d'une grandeur (R_f) caractérisant l'encrassement, à partir d'une valeur d'une première grandeur (k) influençant l'encrassement et d'une valeur d'une deuxième grandeur (X), dans lequel on compense au moins en partie, par la deuxième grandeur (X), une variation de la première grandeur (k) provoquée par une variation d'un débit (F_S, F_P) du premier milieu (S) et/ou du deuxième milieu (P) dans l'échangeur de chaleur (1), dans lequel la première grandeur est une résistance à l'écoulement et dans lequel on détermine la première grandeur (k) et la deuxième grandeur (X), à partir de valeurs de mesure de plusieurs des grandeurs de mesure suivantes

- des pressions du premier milieu (S) et du deuxième milieu (P) à l'entrée et à la sortie de l'échangeur de chaleur (1),

- des débits (F_P, F_S) du premier milieu (S) et du deuxième milieu (P) dans l'échangeur de chaleur (1),

et sans utiliser, lors de la détermination de la première et de la deuxième grandeurs, des propriétés de matière du premier milieu (S) et du deuxième milieu (P) et des propriétés de construction de l'échangeur de chaleur (1).

16. Programme d'ordinateur comprenant des instructions qui, lorsque le programme est réalisé sur un ordinateur, font que l'ordinateur effectue le procédé suivant l'une des revendications 1 à 13.

FIG 1

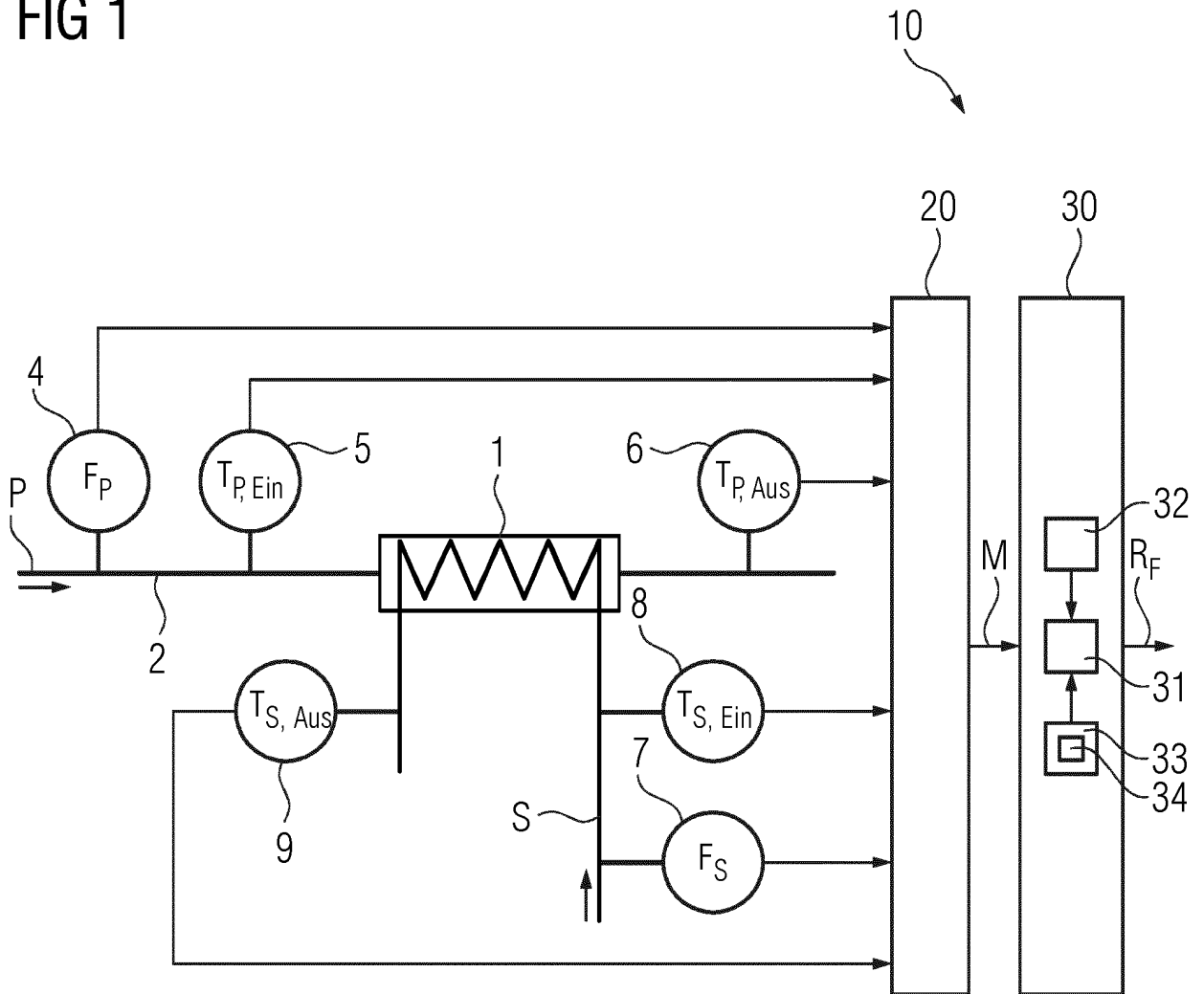


FIG 2

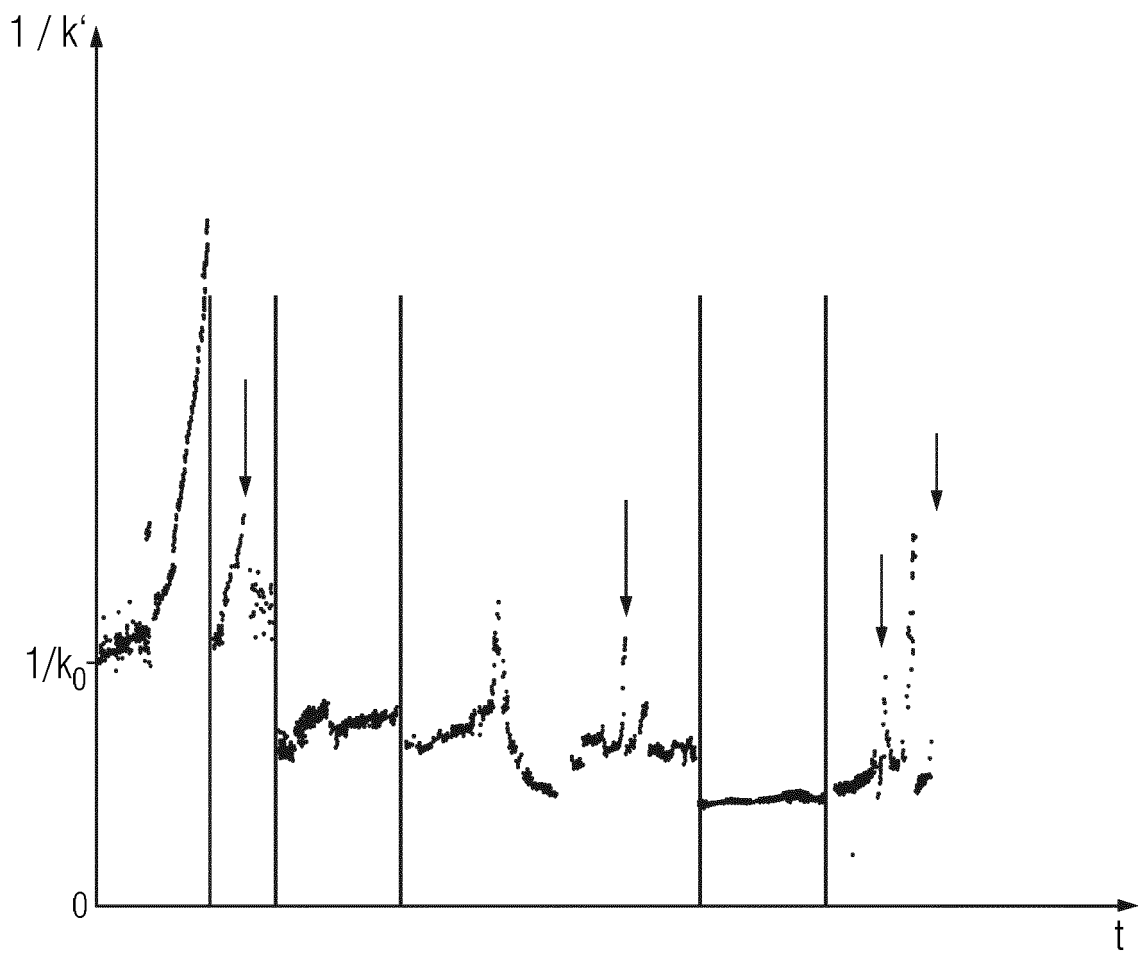


FIG 3

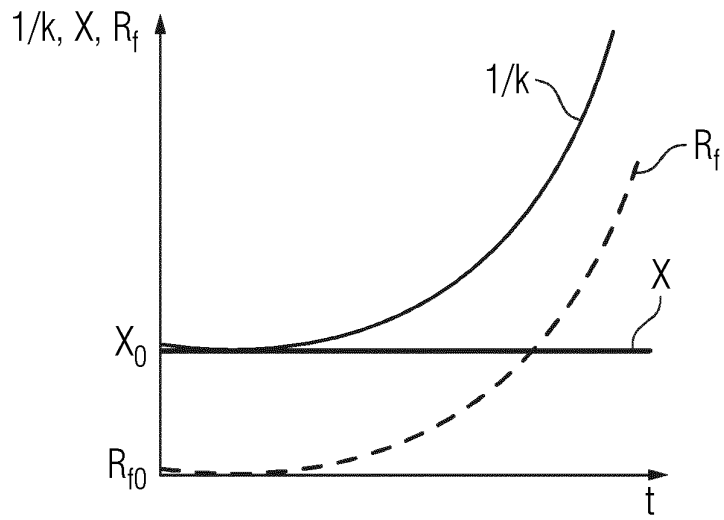


FIG 4

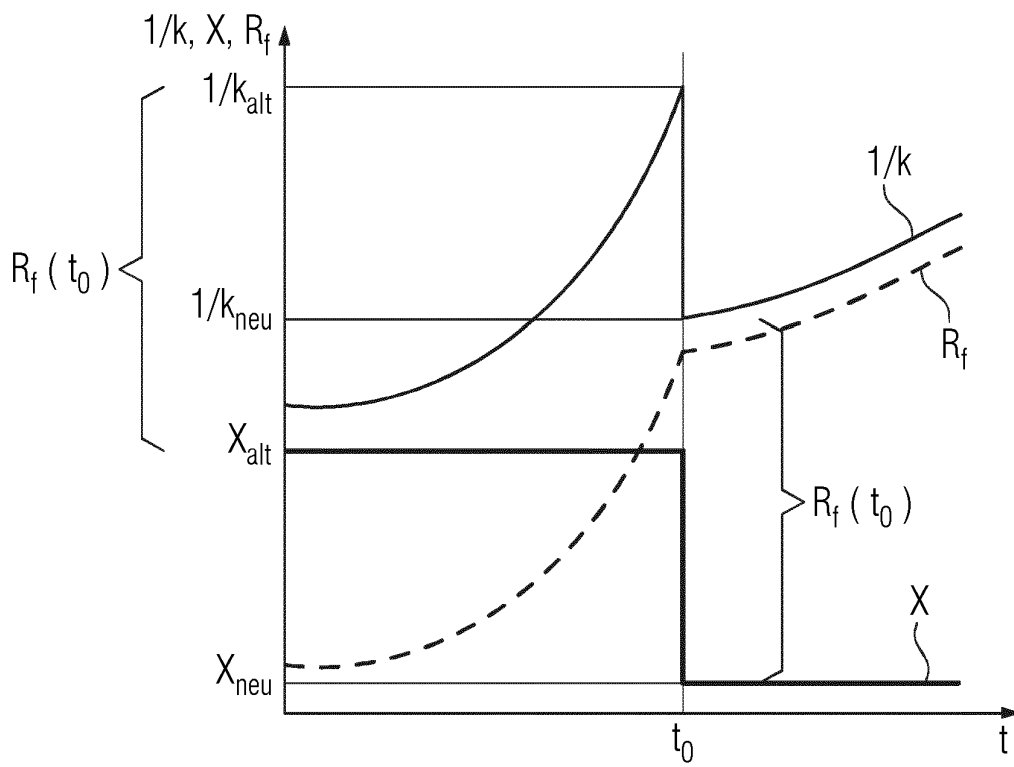


FIG 5

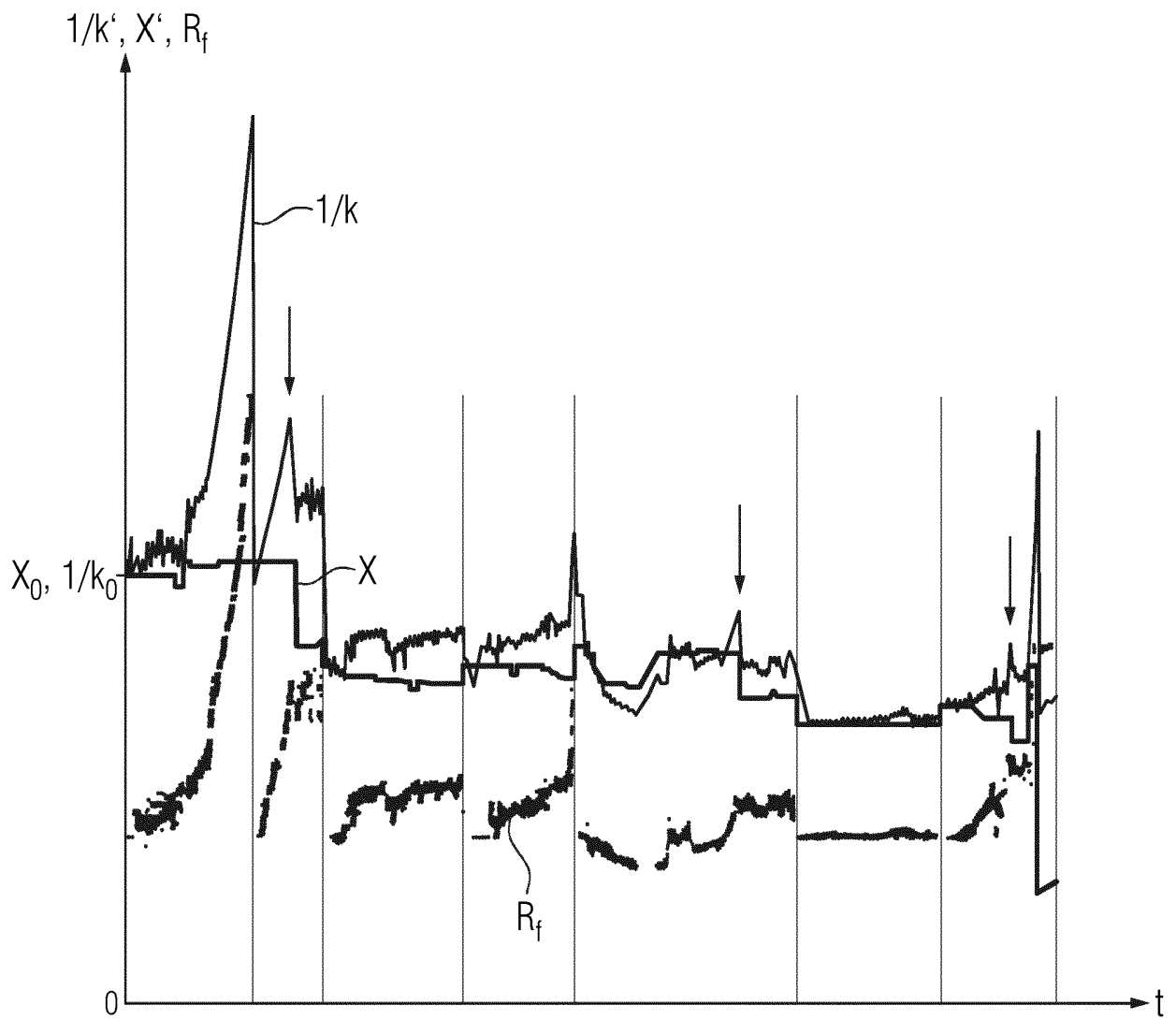


FIG 6

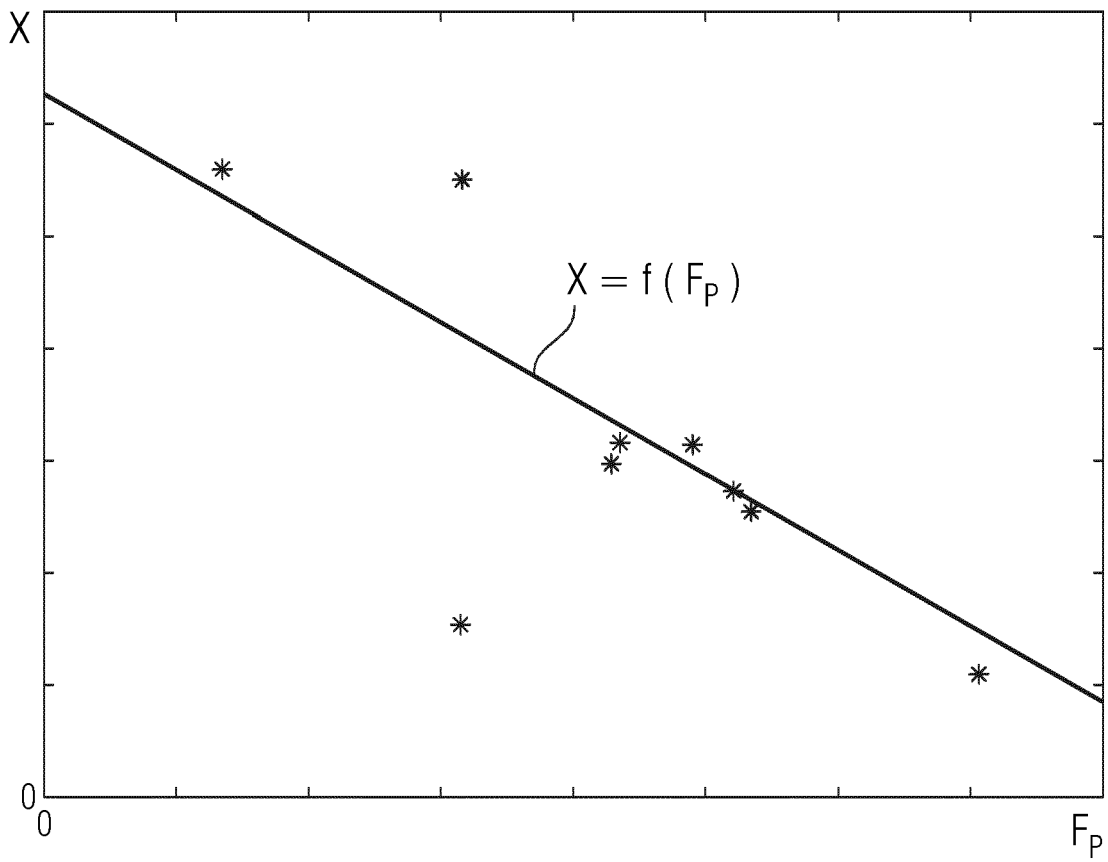


FIG 7

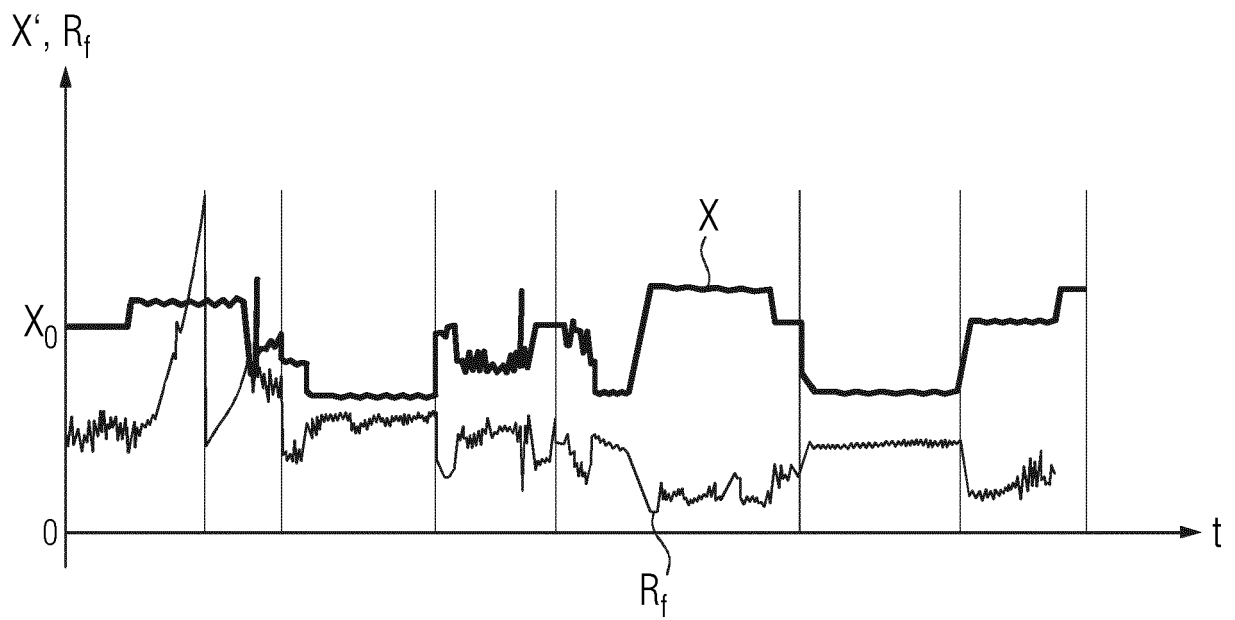


FIG 8

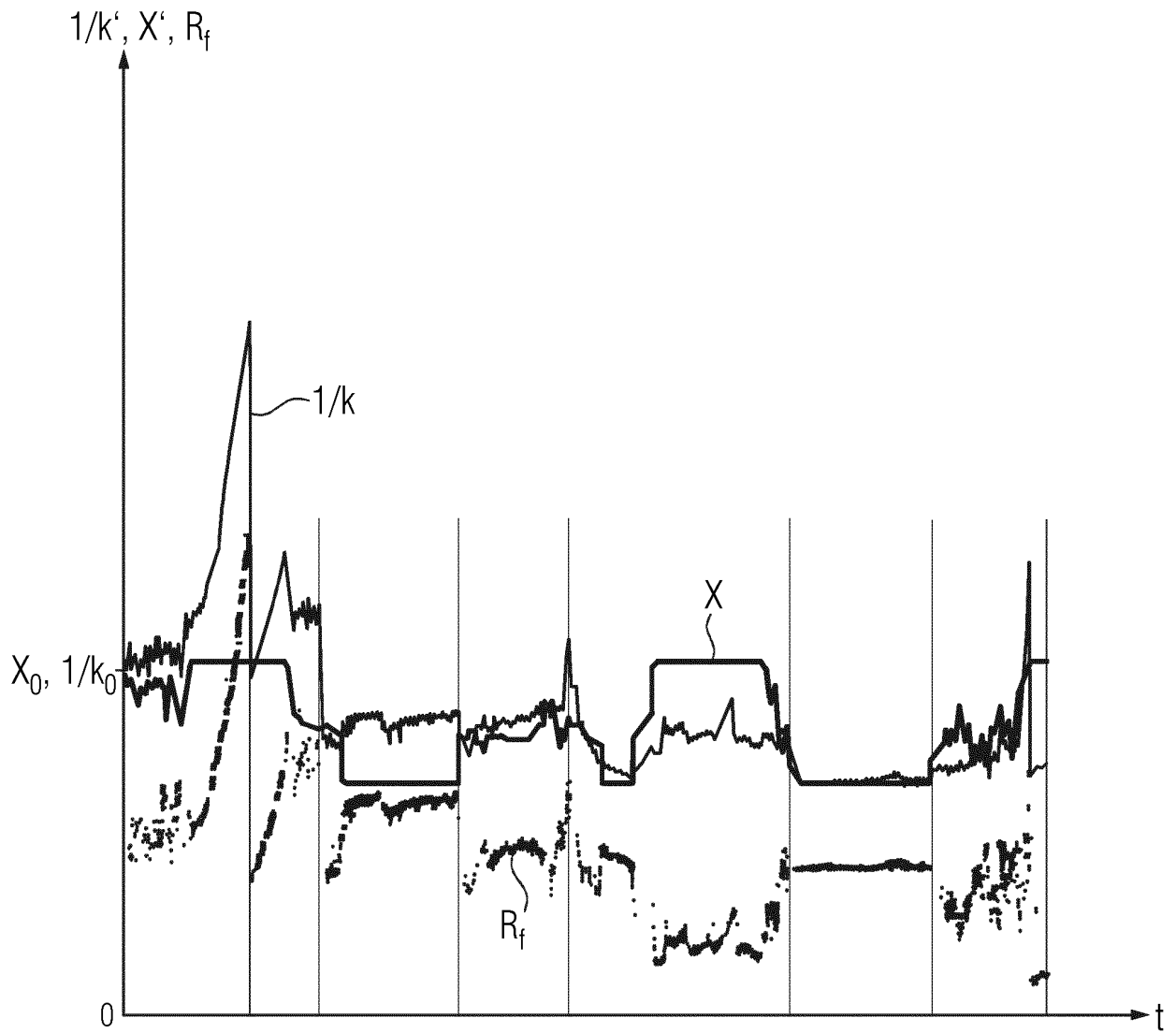


FIG 9

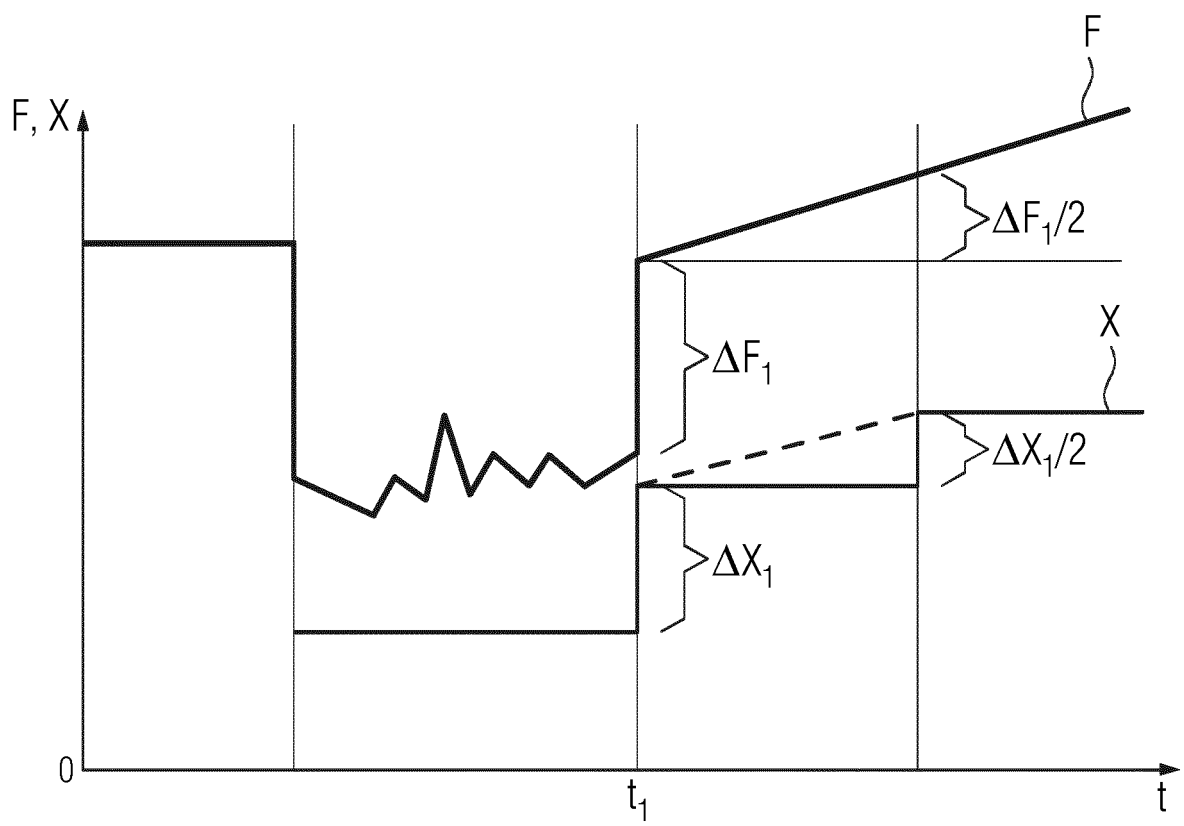


FIG 10

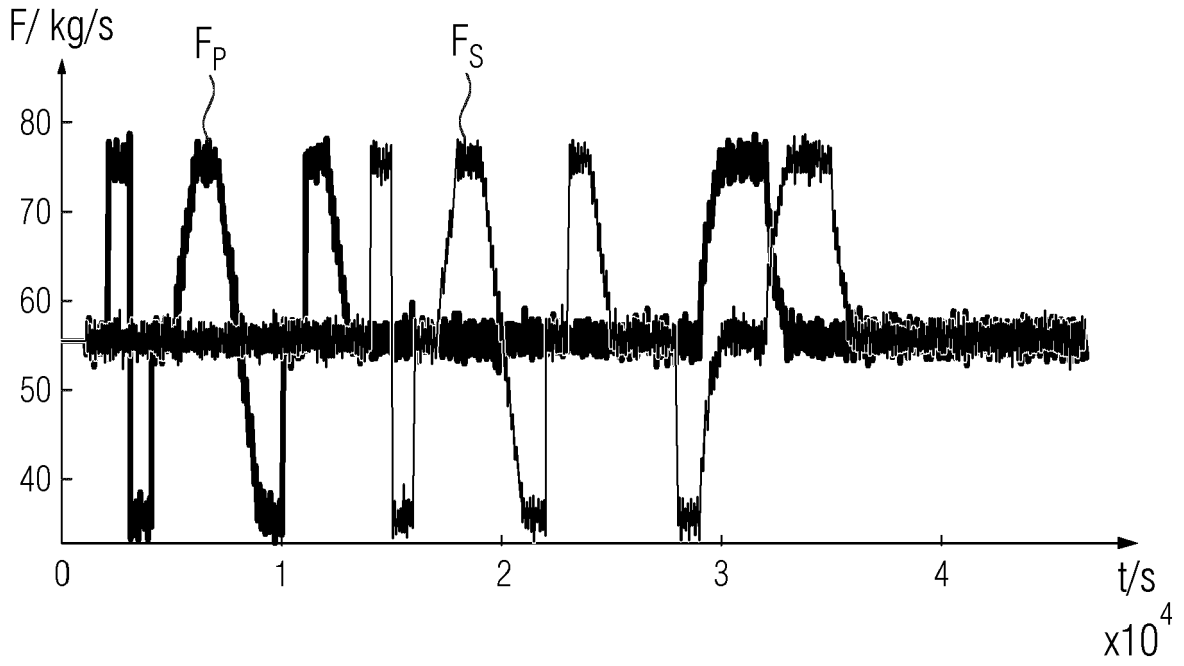


FIG 11

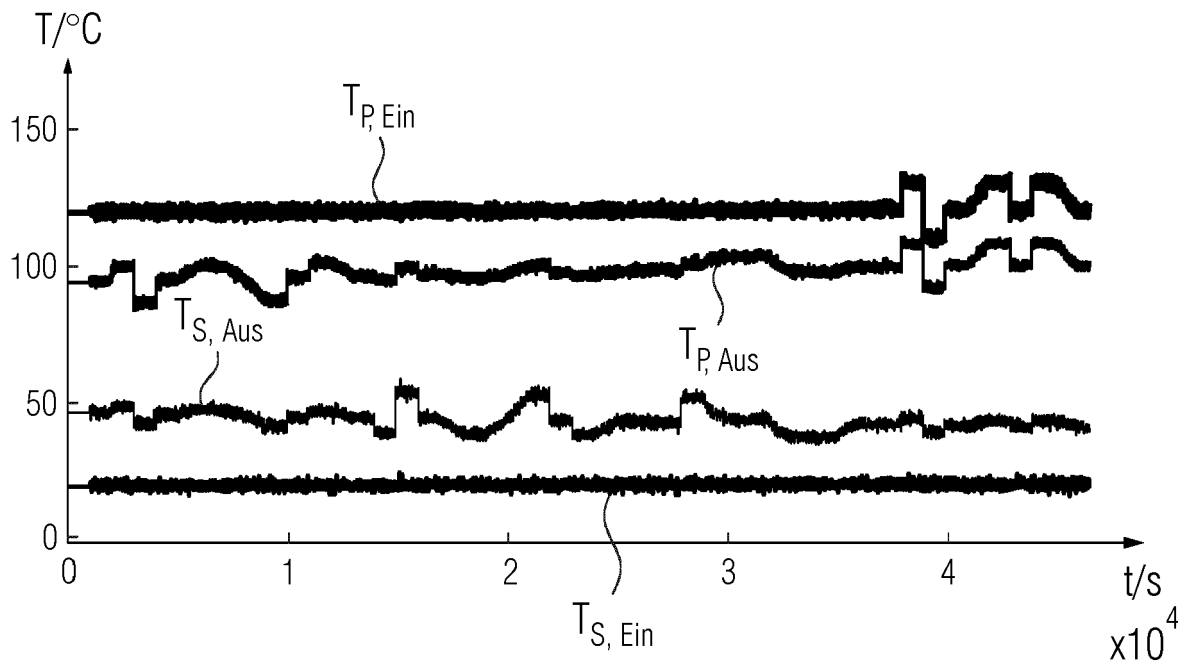


FIG 12

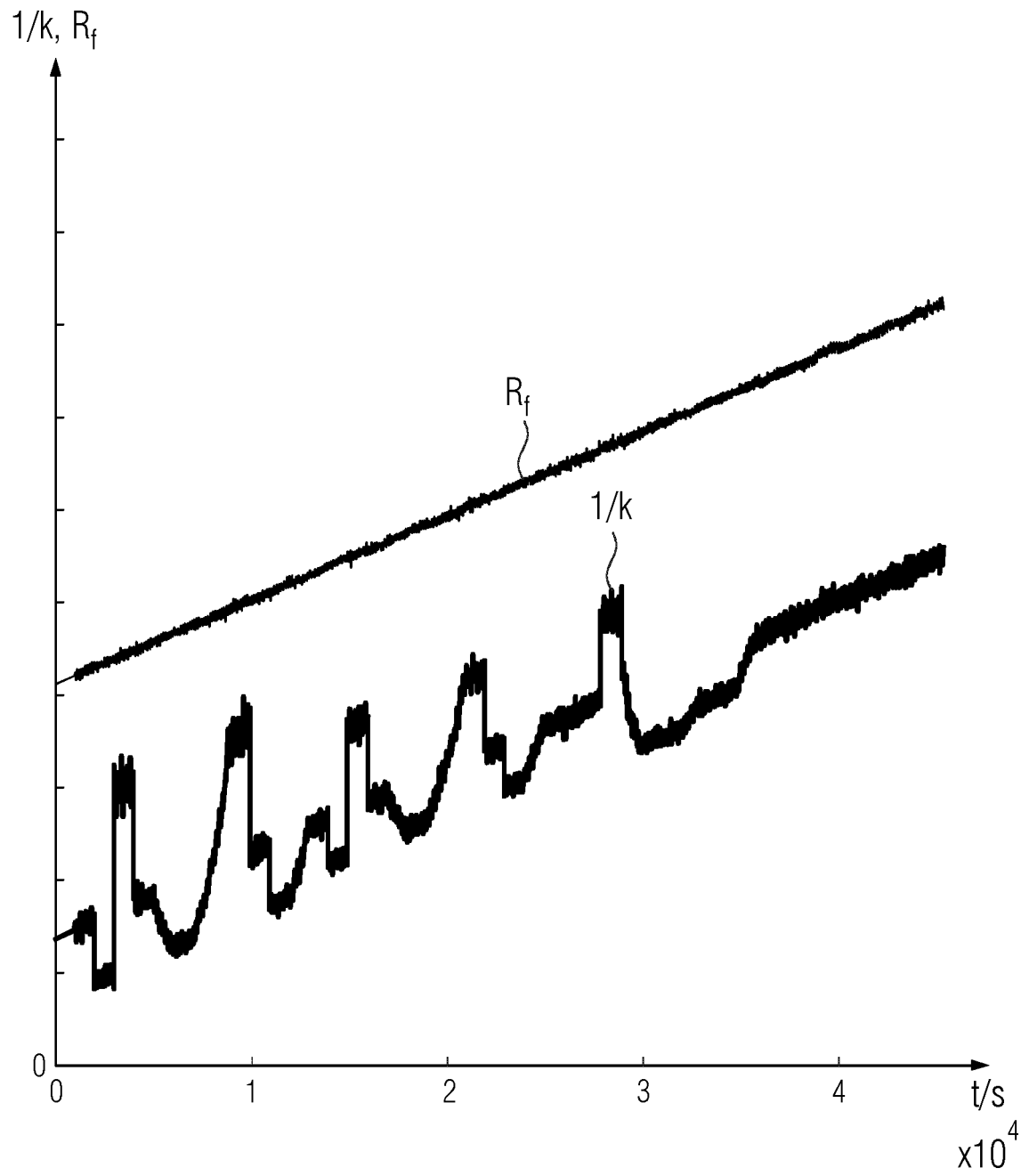


FIG 13

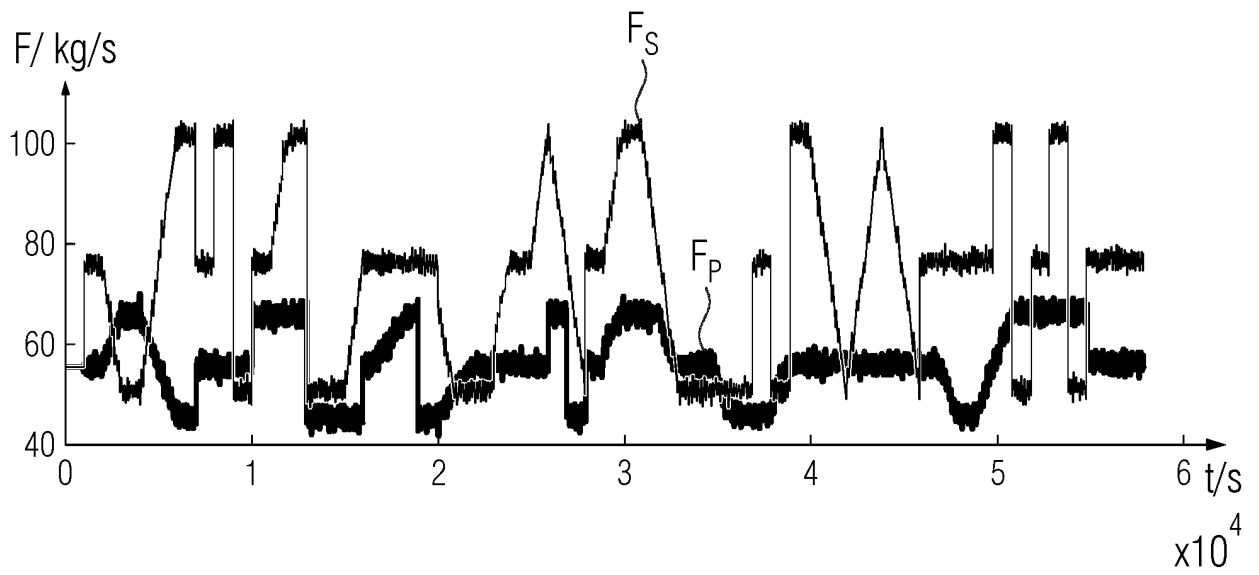


FIG 14

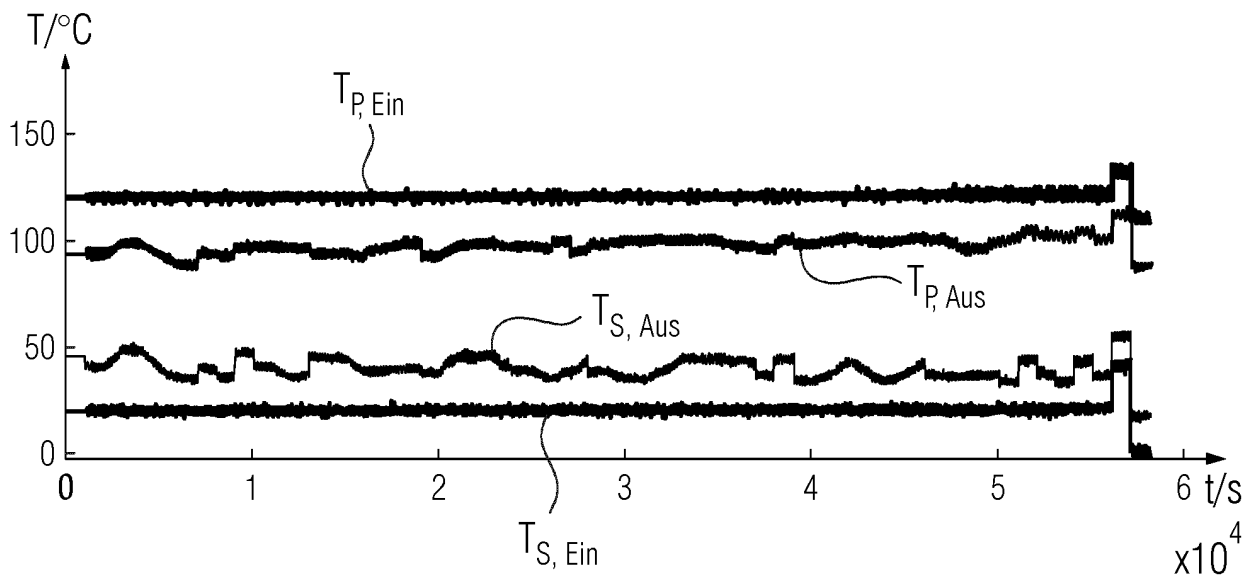


FIG 15

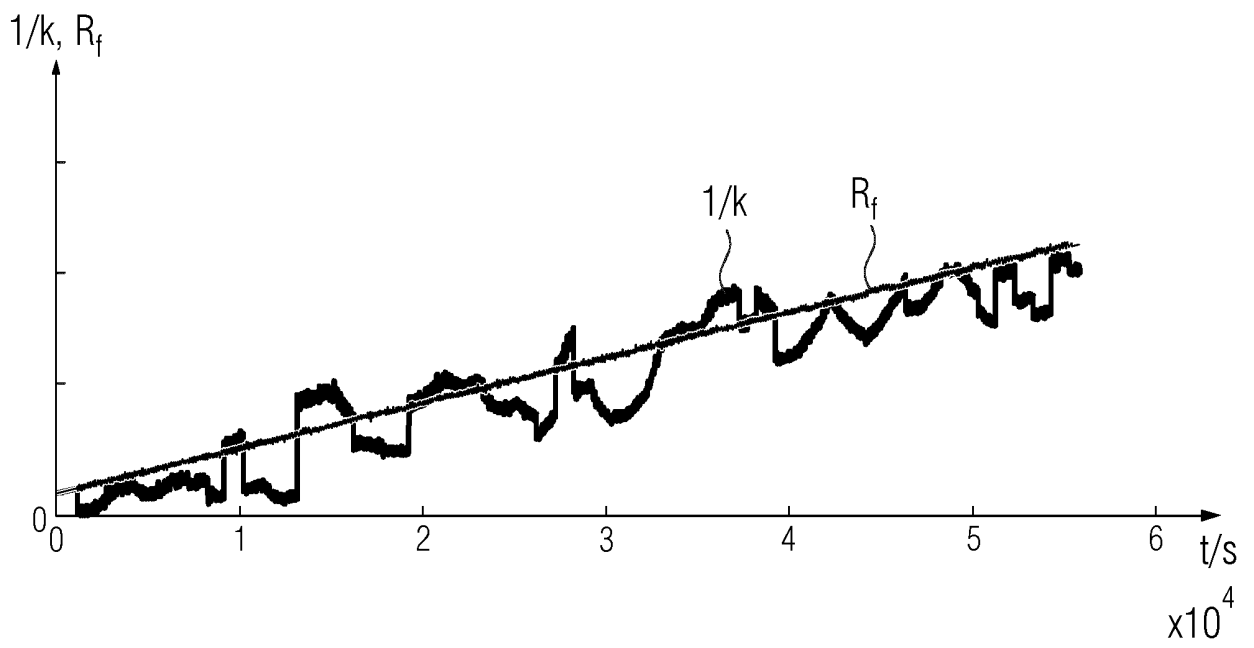
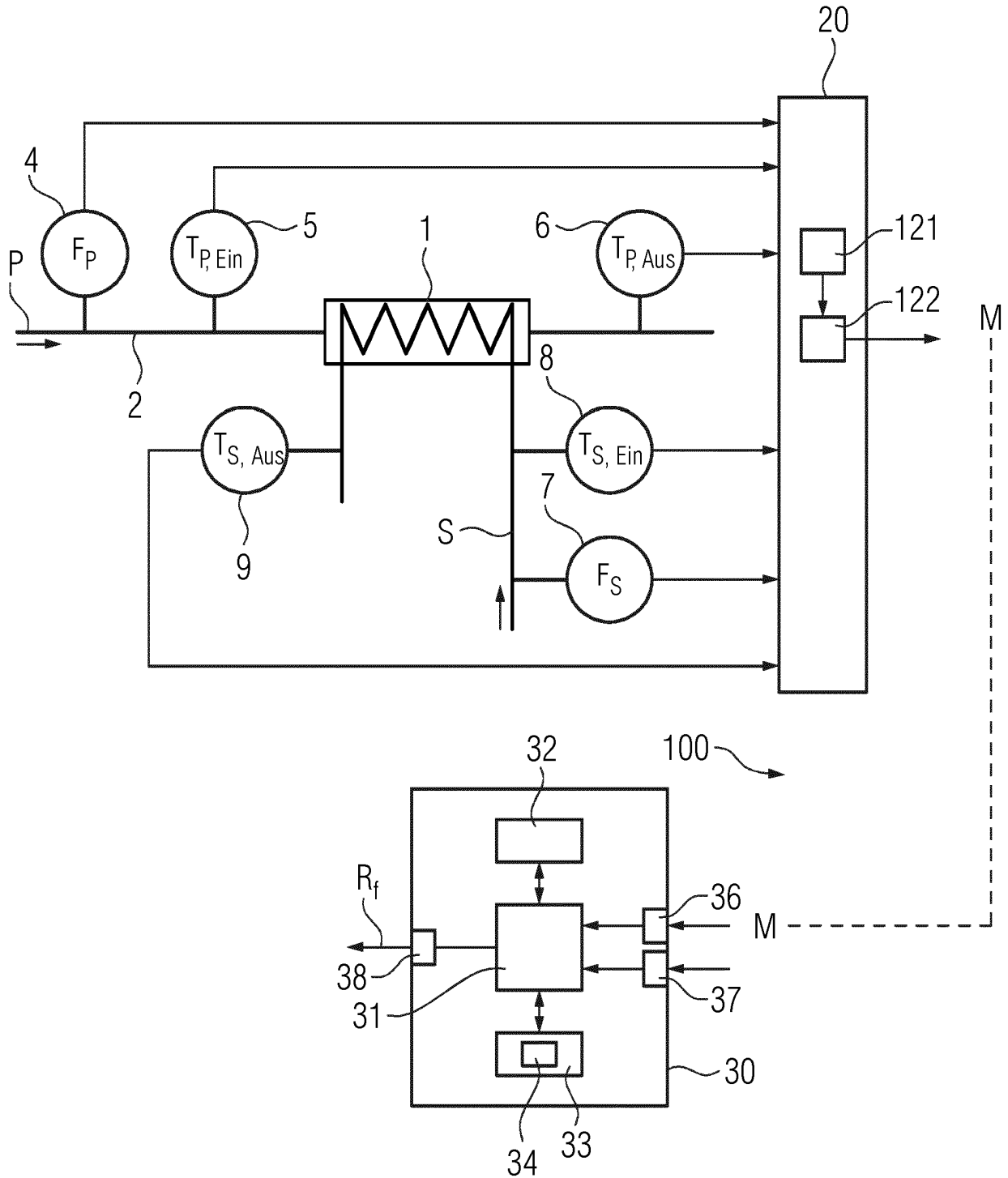


FIG 16



IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- EP 2128551 A1 [0008]
- WO 2019001683 A1 [0009]
- DE 19502096 A1 [0010] [0011]
- US 4390058 A [0010]
- EP 0470676 A2 [0010]
- DE 102016225528 A1 [0013]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **ZOLZER K et al.** Einsatz des Kessel-Diagnose-Systems KEDI im Kraftwerk Staudinger 5. VGB Kraftwerkstechnik, 01. September 1995, vol. 75, 755-762 [0010]