

(51) Int. Cl.: **G01N 25/72** (2006.01)
G01N 25/18 (2006.01)

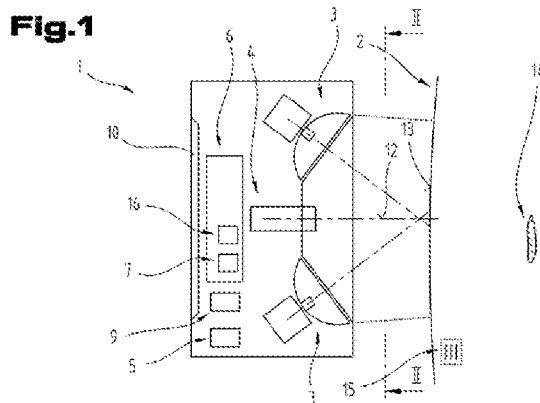
(73) Patentinhaber:
voidsy gmbh
4600 Wels (AT)

(72) Erfinder:
Mayr Gernot Dipl.-Ing.
4400 Steyr (AT)
Mayr Günther Dipl.-Ing. (FH) Dr.techn.
4203 Altenberg (AT)
Plasser Holger Dr.techn. MSc.
4312 Ried in der Riedmark (AT)
Thummerer Gregor Dipl.-Ing. Dr.techn.
3340 Waidhofen an der Ybbs (AT)

(74) Vertreter:
Anwälte Burger und Partner Rechtsanwalt
GmbH
4580 Windischgarsten (AT)

(54) Thermographische Bauteilprüfung

(57) Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur thermographischen Bauteilprüfung mit einer Anregungsquelle zur Erzeugung eines instationären Wärmestroms in einem Prüfling, mit einem Infrarotdetektor-Array zur Detektion einer von einer Oberfläche des Prüflings emittierten Wärmestrahlung einen Oberflächenscanner, einer Steuervorrichtung und einer Auswertevorrichtung, wobei die Vorrichtung eine inertielle Messeinheit zur Detektion von Bewegungen der Vorrichtung umfasst.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur zerstörungsfreien Bauteilprüfung.

[0002] Aus dem Stand der Technik ist die Aktive Thermographie als zerstörungsfreies und bildgebendes Prüfverfahren zur Material- und Bauteilcharakterisierung bekannt. Dieses basiert auf der thermischen Anregung des Testkörpers mittels Absorption von optischer Strahlung, Induktion von Wirbelströmen, Einkopplung von mechanischen Wellen oder andere Energieformen, die zu einer zeitabhängigen Temperaturänderung im Testkörper führen. Durch Infrarotsensoren - ausgeführt als Punkt-, Zeilen- oder Flächendetektor - kann die Wärmestrahlung des Testkörpers berührungslos erfasst werden. Auf Basis des gemessenen Temperaturfeldes an der Bauteiloberfläche wird der zeitlich veränderliche Wärmediffusionsprozess analysiert und es können daraus Bauteilmerkmale detektiert und identifiziert werden. Bekannte technische Realisierungen der Aktiven Thermographie sind beispielsweise Laboraufbauten auf fixen Stativen oder auch mobile, hand- oder robotergeführte Prüfsysteme.

[0003] Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Vorrichtung und ein Verfahren zur zerstörungsfreien Bauteilprüfung zu schaffen, mit dem tiefliegende Bauteilmerkmale bzw. Defekte mit höherer Zuverlässigkeit der dreidimensionalen Bauteilgeometrie zugeordnet werden können. Weiters ist es eine Aufgabe der Erfindung, eine Vorrichtung zu schaffen, mit der zerstörungsfreie Bauteilprüfungen in einem größeren Feld von Anwendungsfällen einsetzbar und mit verbesserter Bedienerfreundlichkeit anwendbar sind.

[0004] Diese Aufgabe wird durch eine Vorrichtung und ein Verfahren gemäß den Ansprüchen gelöst.

[0005] Die erfindungsgemäße Vorrichtung zur thermographischen Bauteilprüfung umfasst eine Anregungsquelle zur Erzeugung eines instationären Wärmestroms in einem Prüfling, ein Infrarotdetektor-Array zur Detektion einer von einer Oberfläche des Prüflings emittierten Wärmestrahlung einen Oberflächenscanner, eine Steuervorrichtung und eine Auswertevorrichtung, wobei die Vorrichtung eine inertielle Messeinheit zur Detektion von Bewegungen der dieser Vorrichtung umfasst. Zudem umfasst die Vorrichtung eine physikalische Einheit zur Nutzerauthentifizierung.

[0006] Von Vorteil ist insbesondere die Weiterbildung der Vorrichtung, wonach die Auswertevorrichtung ein Geometrieerfassungssystem zur Berechnung von räumlichen Koordinaten der Oberfläche des Prüflings umfasst.

[0007] Gemäß einer vorteilhaften Ausbildung der Vorrichtung ist vorgesehen, dass das Geometrieerfassungssystem zur Berechnung einer relativen räumlichen Lage zwischen der Vorrichtung und dem Prüfling ausgebildet ist.

[0008] Eine Weiterbildung der Vorrichtung sieht vor, dass das Infrarotdetektor-Array der Oberflächenscanner und die inertielle Messeinheit relativ zueinander in definierten Abständen und definierten Ausrichtungen in der Vorrichtung angeordnet sind. Dies hat den Vorteil, dass dadurch eine flexible und bedienerfreundliche Anwendbarkeit der Vorrichtung erreicht werden kann.

[0009] Von Vorteil ist auch die Ausbildung der Vorrichtung, wonach die Auswertevorrichtung zur programmgesteuerten Rekonstruktion von Defekten in einem Prüfling oder von Materialunterschieden oder Materialeigenschaften eines Prüflings ausgebildet ist, wobei durch die Auswertevorrichtung aus Daten von Infrarotbildern von dem Infrarotdetektor-Array ein zeit- und ortsabhängiges Oberflächentemperatursignal T_{mess} berechnet wird, und wobei das Oberflächentemperatursignal T_{mess} unter Anwendung eines Regularisierungsverfahrens in eine Spiegelquellendarstellung T_{sq} transformiert wird. Dies hat den Vorteil, dass dadurch rekonstruierte Bauteilmerkmale mit höherer Zuverlässigkeit den wahren Bauteilmerkmalen (Defekte, Grenzflächen, usw.) zugeordnet werden können.

[0010] Für sich eigenständig wird die Aufgabe der Erfindung auch gelöst durch ein Verfahren zur thermographischen Bauteilprüfung eines Prüflings mit einer Vorrichtung, umfassend eine Anre-

gungsquelle, ein Infrarotdetektor-Array einen Oberflächenscanner, eine physikalische Einheit zur Nutzerauthentifizierung, eine Steuervorrichtung und eine Auswertevorrichtung, mit den folgenden Verfahrensschritten: Authentifizieren eines Nutzers, Erfassen einer räumlichen Lage und Ausrichtung der Vorrichtung relativ zu dem Prüfling und Erfassen einer Oberfläche des Prüflings mit dem Oberflächenscanner; Erzeugen eines instationären Wärmestroms in dem Prüfling durch die Anregungsquelle; Aufzeichnen von Infrarotbildern der Oberfläche des Prüflings mit dem Infrarotdetektor-Array während einer vorgewählten Messdauer; Rekonstruktion einer räumlichen Position eines Defekts aus erfassten Daten der Infrarotbilder durch die Auswertevorrichtung, wobei zur Rekonstruktion des Defekts durch die Auswertevorrichtung aus den Daten der Infrarotbilder ein Oberflächentemperatursignal T_{mess} berechnet wird, und wobei das Oberflächentemperatursignal T_{mess} unter Anwendung eines Regularisierungsverfahrens in eine Spiegelquellendarstellung T_{Sq} transformiert wird.

[0011] Als vorteilhaft erweist sich auch, wenn bei dem Verfahren in dem Regularisierungsverfahren eine Green'sche Funktion auf Basis der Wärmeleitungsgleichung angewendet wird.

[0012] Von Vorteil ist die Verfahrensweise, wonach bei der Rekonstruktion der räumlichen Position des Defekts eine Zusatzinformation aus einer Gruppe, umfassend eine Dimensionalität des Wärmeflusses, eine Anzahl von Grenzschichten in dem Prüfling, eine Position von Grenzschichten in dem Prüfling, thermophysikalische Materialeigenschaften oder Randbedingungen, verwendet wird.

[0013] Gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung des Verfahrens ist vorgesehen, dass durch die Vorrichtung eine Bauteilidentifikation erfolgt. Dadurch werden a priori-Informationen des Prüflings als Zusatzinformation verfügbar gemacht.

[0014] Gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung des Verfahrens ist vorgesehen, dass durch die Vorrichtung eine Nutzerauthentifizierung durchgeführt wird. Dadurch werden die Zusatzinformationen vom Gerätenutzer abhängig gemacht.

[0015] Zur Bauteilidentifikation als auch zur Nutzer-Authentifikation können Technologien, wie ein berührungsloses Sender-Empfänger-System (Radio-Frequency Identification-Technologien), optoelektronisch erfassbare Schriften, Strichcodes oder mehrdimensionale Codes (mittels Kamera oder Scanner), biometrische Authentifizierung u.a. durch Gesicht-, Fingerabdruck-, Augeniris- oder Stimmerkennung, manuelle Authentifizierung mittels Benutzerschnittstelle oder Kartenlesegerät, oder digitales Authentifizieren basierend auf kryptographischen Handshakeverfahren verwendet werden.

[0016] Gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung des Verfahrens ist vorgesehen, dass in der Vorrichtung eine inertielle Messeinheit angeordnet wird, wobei das Infrarotdetektor-Array der Oberflächenscanner und die inertielle Messeinheit relativ zueinander in definierten Abständen und definierten Ausrichtungen in der Vorrichtung angeordnet werden.

[0017] Von Vorteil ist auch die Verfahrensweise, wobei die räumliche Lage und Ausrichtung der Vorrichtung relativ zu dem Prüfling durch die inertielle Messeinheit gemessen wird. Dies ermöglicht es, dass durch die inertielle Messeinheit die Bildsequenz korrigiert und stabilisiert werden kann.

[0018] Gemäß einer alternativen Verfahrensweise ist vorgesehen, dass zum Erfassen der räumlichen Lage und Ausrichtung der Vorrichtung und zum Erfassen der Oberfläche des Prüflings externe Datenquellen berücksichtigt werden.

[0019] Eine vorteilhafte Ausbildung des Verfahrens sieht vor, dass Zusatzinformationen über die Bauteilgeometrie und die Materialeigenschaften des Prüflings zur optimierten Diskretisierung des Rekonstruktionsraumes verwendet werden.

[0020] Durch die Verfahrensweise, wonach die Verfahrensschritte ein- oder mehrmals wiederholt, aus einer unterschiedlichen räumlichen Lage und Ausrichtung der Vorrichtung relativ zu dem Prüfling durchgeführt werden und Ergebnisse von Rekonstruktionen der räumlichen Position des Defekts superpositioniert werden, wird der Vorteil einer noch größeren Genauigkeit und Zuver-

lässigkeit der Zuordnung von Defekten bzw. Bauteilmerkmalen zur dreidimensionalen Geometrie des Prüflings erzielt.

[0021] Als vorteilhaft erweist sich auch die Weiterbildung des Verfahrens, wonach aus den Infrarotbildern temperatur- und ortskalibrierte Bilddaten berechnet werden.

[0022] Gemäß einer ebenfalls vorteilhaften Verfahrensweise ist vorgesehen, dass die extrahierten Merkmale der Defekte zur Datenkompression verwendet werden können.

[0023] Zum besseren Verständnis der Erfindung wird diese anhand der nachfolgenden Figuren näher erläutert.

[0024] Es zeigen jeweils in stark vereinfachter, schematischer Darstellung:

[0025] Fig. 1 eine Vorrichtung zur zerstörungsfreien Bauteilprüfung eines Prüflings;

[0026] Fig. 2 eine Ansicht der Vorrichtung, gemäß Fig. 1, entsprechend einer Blickrichtung auf ihre Sensoren bzw. auf ihr Infrarotdetektor-Array;

[0027] Fig. 3 ein Flussdiagramm des Verfahrens zur thermografischen Bauteilprüfung;

[0028] Fig. 4 Details des Regularisierungsverfahrens gemäß Verfahrensschritt „Regularization and Reconstruction“ in Fig. 3;

[0029] Fig. 5 die Vorrichtung bei der Durchführung der thermografischen Prüfung des Prüflings;

[0030] Fig. 6 eine Illustration von mit dem Regularisierungsverfahren durchgeführten Auswerteschritten der gemessenen Oberflächentemperatursignale anhand von zeitlichen und räumlichen Temperaturprofilen;

[0031] Fig. 7 Auswerteschritte des Regularisierungsverfahren eines weiteren Anwendungsfalls, veranschaulicht durch zeitliche und räumliche Temperaturprofilen;

[0032] Fig. 8 ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Vorrichtung zur zerstörungsfreien Bauteilprüfung.

[0033] Einführend sei festgehalten, dass in den unterschiedlich beschriebenen Ausführungsformen gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen bzw. gleichen Bauteilbezeichnungen versehen werden, wobei die in der gesamten Beschreibung enthaltenen Offenbarungen sinngemäß auf gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen bzw. gleichen Bauteilbezeichnungen übertragen werden können. Auch sind die in der Beschreibung gewählten Lageangaben, wie z.B. oben, unten, seitlich usw. auf die unmittelbar beschriebene sowie dargestellte Figur bezogen und sind diese Lageangaben bei einer Lageänderung sinngemäß auf die neue Lage zu übertragen.

[0034] Die Fig. 1 zeigt eine Vorrichtung 1 zur zerstörungsfreien Bauteilprüfung eines Bauteils bzw. Prüflings 2. Die Vorrichtung 1 ist geeignet zur Durchführung eines Verfahrens zur Bauteilprüfung unter Anwendung der aktiven Thermografie und umfasst dazu eine Anregungsquelle 3 und ein Infrarotdetektor-Array 4. Neben einer elektrischen Versorgungseinheit 5 ist weiters eine Steuervorrichtung 6 bzw. eine Prozesseinheit zur Steuerung des Prüfungsablaufs und Steuerung bzw. Regelung der dafür notwendigen Komponenten der Vorrichtung 1 vorgesehen. Ein Teil der Steuervorrichtung 6 wird durch eine Auswertevorrichtung 7 zur programmgesteuerten Bearbeitung der von dem Infrarotdetektor-Array 4 bzw. von weiteren Sensoren detektierten Messsignale gebildet. Weiters umfasst die Vorrichtung 1 einen Oberflächenscanner 8 zur Erfassung der Geometriedaten bzw. der Geometriemerkmale des Prüflings 2. Schließlich ist die Vorrichtung 1 auch mit einer inertialen Messeinheit 9 zur Bewegungsdetektion der Vorrichtung 1 ausgebildet. Weiters umfasst die Vorrichtung 1 auch ein Bedienterminal 10, das außerdem zumindest eine digitale, bidirektionale Kommunikationsschnittstelle zur Bereitstellung von Daten bzw. zum Abruf von Zusatzinformationen von externen Datenquellen umfasst. Optional kann die Vorrichtung 1 auch mit einer optischen Kamera bzw. mit einem optischen Abbildungssystem 11 (einer sogenannten RGB-Kamera) für den sichtbaren Wellenlängenbereich ausgestattet sein.

[0035] Die Fig. 2 zeigt eine Ansicht der Vorrichtung 1 gemäß Fig. 1, entsprechend einer Blick-

richtung auf das Infrarotdetektor-Array 4 bzw. einer Blickrichtung entsprechend einer optischen Achse 12 des Infrarotdetektor-Array 4.

[0036] Wie in der Fig. 1 dargestellt, weist der Prüfling 2 unterhalb einer Oberfläche 13 in seinem Inneren eine - vereinfacht im weiteren als Defekt 14 bezeichnete - Inhomogenität auf.

[0037] Die Fig. 3 zeigt anhand eines Flussdiagramms den Ablauf des Verfahrens zur thermografischen Bauteilprüfung an dem Prüfling 2 (Fig. 1). Es handelt sich dabei um einen mehrstufigen Signalverarbeitungsprozess. Im Zuge einer initialen Messung (inertiale Messeinheit 9) wird zunächst die Oberfläche 13 des Prüflings 2 optisch erfasst und die initiale Pose (Position und Ausrichtung) der Vorrichtung 1 relativ zu dem Prüfling 2 bzw. dessen Oberfläche 13 bestimmt. Vor der thermischen Anregung des Prüflings 2 mit der Anregungsquelle 3 werden mit dem Infrarotdetektor-Array 4 ein oder mehrere statische (passive) Infrarotbilder des Prüflings 2 erfasst.

[0038] Durch Feststellen von Transformationsparametern können einem oder mehreren Koordinatenpunkten p_{41} jeweils ein Bildpunkt $l(u,v)$ zugeordnet werden (Fig. 5). Da zwischen der Lagebestimmung der Vorrichtung 1, der thermischen Anregung mittels der Anregungsquelle 3 und der Aufnahme der thermischen Antwort durch das Infrarotdetektor-Array 4 keine Bewegung der Vorrichtung 1 erfolgt, gilt diese Zuordnung auch für den zeitlich dynamischen Teil der von dem Prüfling 2 emittierten Infrarotstrahlung und muss daher nicht notwendigerweise während der Messung der thermischen Anregung und Antwort durchgeführt werden. Die Koordinatentransformation kann durch eine zuvor durchgeführte Kalibrierung des Infrarotdetektor-Array 4 und des Oberflächen-scanners 8 oder durch Bildregistrierungsverfahren auf Basis von charakteristischen Bildmerkmalen, wie Kanten oder Unterschieden im Emissionsgrad, festgestellt werden.

[0039] Zur Reduktion von Artefakten im Rekonstruktions- und Registrierungsschritt erfolgt eine Konsolidierung der Scannerdaten (gegebenenfalls Entfernen von Ausreißern, Rauschfilterung, Reduktion von Bildgröße, Reduktion der örtlichen Auflösung). Des Weiteren wird jeweils ein Normalvektor n_p 42 für alle relevanten Koordinatenpunkte 41 der Oberfläche 13 des Prüflings 2 bestimmt. Die Normalvektoren n_p 42 sind hierbei immer in Richtung des Bauteilinneren orientiert (Fig. 5).

[0040] Nach der thermischen Anregung mit der Anregungsquelle 3 wird die thermische Antwort des Prüflings 2 durch Aufzeichnung von Infrarotbildern mit dem Infrarotdetektor-Array 4 hinreichend lange erfasst. Die Messdauer und Anregungsform bestimmt dabei die gewünschte Eindringtiefe in den Prüfling 2. Die Bildwiederholrate bei der Aufnahme der Infrarotbilder durch das Infrarotdetektor-Array 4 bestimmt das Auflösungsvermögen in axialer Richtung der Vorrichtung 1, das heißt in Tiefenrichtung des Prüflings 2.

[0041] Mit Hilfe der Auswertevorrichtung 7 wird die thermische Antwort für jeden Bildpunkt mittels einer sogenannten Regularisierung in eine Spiegelquellendarstellung invers transformiert. In dieser Darstellung werden unter der Oberfläche liegende Strukturen, wie der Defekt 14, als pulsartige Merkmale in einem diskreten, äquidistanten Signal $l(u,v,w)$ dargestellt.

[0042] Die Fig. 3 gibt eine Übersicht über die bei den thermografischen Prüfungsverfahren durchzuführenden Maßnahmen als auch deren zeitlicher Abfolge. Nach Inbetriebnahme der Vorrichtung 1 erfolgt mit Hilfe der inertialen Messeinheit 9 (IMU) eine Bestimmung der räumlichen Lage, als auch der Ausrichtung der Vorrichtung 1. Andererseits wird mit Hilfe des Oberflächen-scanners 8 die äußere Geometrie des Prüflings 2 vermessen. Die dabei erhaltenen Messdaten liefern als Maßnahme 100 Informationen über die Geometrie als auch die räumliche relative Anordnung von Vorrichtung 1 und Prüfling 2. Die Messungen gemäß Maßnahme 100 werden vorzugsweise permanent, das heißt über den gesamten zeitlichen Verlauf der Bauteilprüfung des Prüflings 2 hinweg andauernd vorgenommen. Dies ist insbesondere von Vorteil für den Fall, dass die Vorrichtung 1 als handgeführtes Gerät ausgebildet ist. Abschnitt 101 umfasst vor der thermischen Anregung des Prüflings 2 erfolgende Messungen bzw. Detektionen. So werden von der thermischen Anregung mit dem Infrarotdetektor-Array 4 ein oder mehrere statische (passive) Infrarotbilder des Prüflings 1 aufgezeichnet und Transformationsparameter zur Zuordnung von Koordinatenpunkten p_{41} zu jeweiligen Bildpunkten $l(u,v)$ der Infrarotbilder festgestellt. In einem anschließenden

Abschnitt 102 erfolgt die thermische Anregung mit Hilfe der Anregungsquelle 3 und gleichzeitig eine Erfassung der thermischen Antwort durch Aufzeichnung einer Folge von Infrarotbildern durch das Infrarotdetektor-Array 4. Die dabei aufgezeichneten Bilder des Infrarotdetektor-Array 4 repräsentieren Oberflächentemperaturdaten $T_{\text{mess}}(p)$ von Punkten p der Oberfläche 13 des Prüflings 2 als auch den zeitlichen Verlauf der Oberflächentemperaturen. Die so erhaltenen Oberflächentemperatursignale werden in einem abschließenden Abschnitt 103 einer Auswerteprozedur unter Verwendung der Auswertevorrichtung 7 unterzogen. Die Oberflächentemperatursignale T_{mess} werden dazu einem sogenannten Regularisierungsverfahren unterzogen. Dieses ermöglicht eine Rekonstruktion des Defekt 14 in dem Prüfling 2.

[0043] Die Fig. 4 zeigt ein Detail der Fig. 3 entsprechend dem Verfahrensschritt „Regularisation and Reconstruction“, im Abschnitt 103, weiter spezifiziert. Im Anschluss an die Aufzeichnung der thermischen Antwort von der Oberfläche 13 des Prüflings 2 mit Hilfe des Infrarotdetektor-Array 4 erfolgt eine Transformation in die erwähnte Spiegelquellendarstellung. Um Defekte 14, die an der Oberfläche 13 oder unter der Oberfläche 13 liegen, zu rekonstruieren oder Materialparameter zu bestimmen, wird das gemessene Oberflächentemperatursignal $T_{\text{mess}} \in \mathbb{R}^{(N_t \times N_u \times N_v)}$ in die entsprechende Spiegelquellendarstellung $T_{\text{Sq}} \in \mathbb{R}^{(N_w \times N_u \times N_v)}$ transformiert ($\mathbb{R}$, Menge der reellen Zahlen). Hierbei beschreiben N_u und N_v die Anzahl der Pixel des Flächendetektors des Infrarotdetektor-Array 4 in u - und v -Richtung. Die Anzahl der Zeitschritte für die Messung wird durch N_t abgebildet und die Anzahl der Koordinatenpunkte in Tiefenrichtung wird durch N_w repräsentiert. Die Transformationsmatrix $K \in \mathbb{R}^{(N_t \times N_w)}$ kann dabei im einfachsten Fall durch eine Green'sche Funktion mit der thermischen Diffusivität α_{33} in der folgenden Form abgebildet werden.

$$G(t, w') = \frac{1}{\sqrt{4\pi\alpha_{33}t}} \exp\left(-\frac{w'^2}{4\alpha_{33}t}\right) \dots \text{Gleichung (1)}$$

[0044] Diese Funktion entspricht der Fundamentallösung der Wärmeleitungsgleichung. An dieser Stelle sei auch erwähnt, dass auch andere Green'sche Funktionen aufgrund von vorliegenden Bauteilmerkmalen und Prüfumgebungsmerkmalen verwendet werden können. Mit der Temperaturleitfähigkeit in Tiefenrichtung α_{33} und mit den diskreten Zahlenschritten $t_l = l \Delta_t$ sowie $t_j = j \Delta_z$ und unter der Verwendung der Laufvariablen $l = \{0, 1, 2, \dots, N_t-1\}$ und $j = \{0, 1, 2, \dots, N_w-1\}$, können die Elemente der Transformationsmatrix K , unter Verwendung der oben angegebenen Green'schen Funktion, wie folgt geschrieben werden:

$$K(l, j) = \frac{\xi \Delta_w}{\sqrt{4\pi\alpha_{33}\Delta_t l}} \exp\left(-\frac{\xi^2 \Delta_w^2 j^2}{4\alpha_{33}\Delta_t l}\right) = \frac{\eta}{\sqrt{\pi l}} \exp\left(-\frac{\eta^2 j^2}{l}\right) \dots \text{Gleichung (2)}$$

[0045] Dabei beschreibt der Term $\eta = \frac{\xi \Delta_w}{4\alpha_{33}\Delta_t}$ eine dimensionslose Zahl, wobei ξ ein dimensionsloser Skalierungsparameter zur Optimierung der Qualität der inversen Lösung ist und Δ_t die zeitliche Auflösung des Oberflächentemperatursignals abbildet sowie Δ_w die Tiefenauflösung für die Spiegelquellendarstellung repräsentiert.

[0046] Durch eine mathematische Faltung des Transformationskernels bzw. der Transformationsmatrix K bezüglich der Zeit und des Ortes können mögliche zeitliche und örtliche Anregungsmuster berücksichtigt werden. Da die Diffusionsvorgänge und somit die Wärmeleitungsgleichung auf makroskopischer Ebene betrachtet werden, ergibt sich in der diskreten Form eine lineare Matrixgleichung $T_{\text{mess}} = K T_{\text{Sq}}$ und daher ein lineares inverses Problem. Dabei kann außerdem festgestellt werden, dass die Gleichung (2) keine Abhängigkeit von den transversalen Koordinaten u und v aufweist. Das Lösen der Matrixgleichung $T_{\text{mess}} = K T_{\text{Sq}}$ stellt daher ein lokales inverses Problem dar. Das heißt, dass das gemessene Temperatursignal lokal (pixelweise) in die entsprechende Spiegelquellendarstellung transformiert werden kann.

[0047] Für die Transformation muss aufgrund der Entropieproduktion während der Wärmediffusion ein sehr schlecht gestelltes inverses Problem gelöst werden. Dafür können unterschiedliche Regularisierungsverfahren eingesetzt werden. Es sei außerdem angemerkt, dass das inverse Problem auch unter der Verwendung von Machine Learning-Ansätzen gelöst werden kann.

[0048] Im vorliegenden Fall wird das inverse Problem unter Hinzuziehung von Zusatzinformationen, wie beispielsweise Positivität oder Sparsity (Lösungsmatrix ist dünn besetzt) im Auswerteprozess gelöst. Die berechnete Spiegelquellen-Verteilung als Funktion der Tiefe offenbart die Merkmale des gemessenen Oberflächentemperatursignals bezüglich baugleichen Grenzflächen (Oberfläche 13) und Defektgrenzflächen in Form von Quellen (positive Amplitude) und Senken (negative Amplitude). Die Quellen und Senken können dabei beispielsweise durch Defekte oder den vorherrschenden Randbedingungen entstehen, wobei Merkmale aufgrund von Defekten eindeutig von Merkmalen aufgrund der Randbedingungen unterschieden werden können. Die Randbedingungen oder Prüfumgebungsmerkmale können dabei durch die Wärmeleitung, die Wärmestrahlung oder die Konvektion oder eine Mischung dieser Effekte beschrieben werden. Zudem liefern adiabate Randbedingungen nur positive Spiegelquellenamplituden. Wärmestrahlung und Konvektion können sowohl negative als auch positive Spiegelquellenamplituden liefern (Fig. 6, 7).

[0049] Basierend auf den Defektmerkmalen kann die Tiefenlage des Defekts 14 nur grob abgeschätzt werden. Zudem liefern die Amplituden aufgrund der Randbedingen und der Beobachtungsoberfläche keine relevanten Informationen bezüglich des Defekts 14 und der Position der Rückwand. Daher werden die Amplituden aufgrund des Defekts 14 und der Rückwand extrahiert. Aus dem resultierenden Signal wird sodann ein rauschfreies Defekttemperatursignal berechnet. Durch das Eliminieren des Rauschsignals kann nun, durch die Auswertung des maximalen Defekttemperatursignals, die Defekttiefe genauer bestimmt werden.

[0050] Aus der berechneten Defekttiefe kann sodann ein Ersatzspiegelquellensignal $I \in \mathbb{R}^{(N_u \times N_v \times N_w)}$ für jedes Pixel des Infrarotdetektor-Array 4 und jedes Defektsignal für eine mehrdimensionale Defektdarstellung bestimmt werden (siehe Fig. 6f und Fig. 6h).

[0051] Im Übrigen gilt, wenn die thermische Effusivität des Grundmaterials e_2 größer ist als die thermische Effusivität des Defektmaterials e_1 , dass auf der Tiefenskala der Spiegelquellenverteilung die positive Amplitude (Quelle) vor der negativen Amplitude (Senke) ersichtlich ist (Fig. 6c, 6d). Wenn e_1 größer ist als e_2 , dann ergibt sich auf der Tiefenskala zuerst eine Senke und dann eine Quelle (Fig. 7).

[0052] Die geschilderte Transformation des gemessenen Temperatursignals in die entsprechende Spiegelquellendarstellung berücksichtigt keine transversale Diffusionsvorgänge sowie Geometrieinformationen des möglicherweise anisotropen und komplex geformten Prüflings 2.

[0053] In einem weiteren Auswerteschritt und mit Hilfe der durch den Oberflächenscanner 8 aufgezeichneten Geometrieinformationen des Prüflings 2 in Verbindung mit bekanntem Temperaturleitfähigkeitstensor α kann eine örtliche Filterung durchgeführt werden. Dadurch ist eine genauere Rekonstruktion der wahren Grenzflächenabmessungen möglich. Diese örtliche Filterung kann ebenfalls durch das Lösen eines inversen Problems durchgeführt werden. Dieser weitere und optionale Auswerteschritt empfiehlt sich speziell für Defekte 14, die tief unter der Oberfläche 13 des Prüflings 2 liegen und dann, wenn das Verhältnis der Temperaturleitfähigkeiten in transversaler Richtung und Tiefenrichtung groß ist.

[0054] Gemäß der Darstellung in Fig. 4 durchlaufen die Oberflächentemperatursignale zu deren Auswertung der Regularisierung und Defektrekonstruktion eine Abfolge mehrerer Schritte. Ein erster Schritt 111 entspricht dabei der Detektion des Oberflächentemperatursignals T_{mess} . Im anschließenden Schritt 112 erfolgt die Transformation des gemessenen Oberflächentemperatursignals T_{mess} in die entsprechende Spiegelquellenverteilung entsprechend der Linearmatrixgleichung $T_{\text{mess}} = K T_{\text{Sq}}$. In einem anschließenden Schritt 113 werden Defektmerkmale extrahiert. Im Schritt 114 erfolgt eine Berechnung des Defekttemperatursignals basierend auf den extrahierten Defektmerkmalen. Der folgende Schritt 115 entspricht der Bestimmung der realen Defekttiefe aus dem berechneten Defekttemperatursignal. Die reale Defekttiefe wird in einem anschließenden Schritt 116 verwendet, um ein Ersatzspiegelquellensignal zu berechnen. In einem abschließenden Schritt 117 erfolgt eine örtliche Filterung basierend auf der gemessenen Geometrieinformation des Prüflings 2 und Informationen über den bekannten Temperaturleitfähigkeitstensor. Basierend auf den dabei erhaltenen Ergebnissen kann die Größenbestimmung des Defekts 14 in

dem Prüfling 2 verbessert bzw. optimiert werden.

[0055] Die Fig. 5 zeigt die Vorrichtung 1 bei der Durchführung der thermografischen Prüfung des Prüflings 2.

[0056] Mit Hilfe der Anregungsquelle 3 ist der Prüfling 2 bereits thermisch angeregt worden und wird durch das Infrarotdetektor-Array 4 der Vorrichtung 1 die thermische Antwort des Bauteils über eine vorgegebene Messdauer detektiert als auch mit Hilfe der Oberflächenscanners 8 der Vorrichtung 1 die Geometrieinformationen erfasst (Fig. 1, 2). Das heißt es wird von dem Infrarotdetektor-Array 4 eine Folge von Wärmebildern aufgezeichnet. Aus der mindestens einen räumlichen Lage k der Vorrichtung 1 wird darauf basierend ein 3D-Tiefensignal $I_k(u,v,w)$ rekonstruiert (w Tiefe). Voraussetzungsgemäß muss dabei für einen Oberflächenpunkt p_i 41 und einem zugehörigen, normierten normalen Vektor n_{pi} 42 zumindest eine Bildposition (u_{p^*}, v_{p^*}) vorhanden sein. Relevante Ersatzmerkmalspositionen 43 aus dem Tiefensignal $I_k(u_{p^*}, v_{p^*}, w)$ werden dazu in ein globales Koordinatensystem projiziert.

[0057] Bei bekannten Materialparametern (beispielsweise in Form einer Temperaturleitfähigkeitssensors) und bei aus der Oberfläche 13 implizit bekannten oder manuell definierten Normalvektoren 42 setzt sich ein relevantes Ersatzmerkmal P 44 im globalen Koordinatensystem aus dessen Position und dessen Intensität zusammen.

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_i + n_{pi} \sqrt{w \Delta t \alpha} \\ I_t(u_{p^*}, v_{p^*}, w) \end{bmatrix}$$

[0058] Die Projektion von Ersatzmerkmalspositionen 43 einer oder mehrerer Datensätze $I(u,v,w)$ in das globale Koordinatensystem führen gemäß Fig. 5 zu einer Aggregation von Ersatzmerkmalen 44 auf oder nahe der Position des physikalischen Bauteilmerkmals, sofern die Ersatzmerkmale 44 zum selben Bauteilmerkmal (Defekt 14) gehören. Dies ist beispielsweise der Fall bei benachbarten Oberflächenpunkten aus einer Bemessung oder deckungsgleichen oder benachbarten Oberflächenpunkten aus mehreren Messungen (das heißt einer Mehrfachdurchführung der Schritte 101, 102 und 103 gem. Fig. 3) aus deckungsgleichen oder unterschiedlicher räumlicher Lage der Vorrichtung 1. Eine solche Aggregation von Ersatzmerkmalen ist auch der Fall, wenn Oberflächenpunkte aus mehreren Messungen (das heißt einer Mehrfachdurchführung der Schritte 101, 102, 103 gem. Fig. 3) aus gegenüberliegenden räumlichen Lagen der Vorrichtung 1, wenn das zu prüfende Bauteil bzw. der Prüfling 2 hinreichend dünn bzw. die Messung der Temperaturantwort hinreichend lange ist. In einem solchen Fall ist in jeder Messung die gegenüberliegende, nicht sichtbare Bauteiloberfläche als Ersatzmerkmal sichtbar.

[0059] Die zu überlagernden Thermografiemessungen dürfen sich zueinander hinsichtlich aller üblichen Messparameter unterscheiden, da diese als Vorabinformationen bei der Rekonstruktion und Positionierung der Ersatzmerkmale 44 berücksichtigt werden können. Diese Messparameter können sein: die zeitliche und örtliche Anregungsform durch die Anregungsquelle 3; die Messfrequenz (entsprechend der Aufzeichnung von Wärmebildern durch das Infrarotdetektor-Array 4); die Ortsauflösung und der Abstand der Oberfläche 13 des Prüflings 2 bzw. die räumliche Lage der Vorrichtung 1.

[0060] Bei einer Speicherung der transformierten Daten in Form einer Punktwolke (d.h. die Koordinaten liegen explizit vor) kann die Tiefenauflösung unabhängig von der Auflösung der Geometrieerfassung durch den Oberflächenscanner 8 definiert werden. Neben der Ersatzmerkmalsposition kann einem Datenpunkt auch die Ersatzmerkmalsintensität zugeordnet werden. Diese ermöglicht eine verbesserte Visualisierung der Merkmale des Prüflings 2, beispielsweise durch Texturierung von Punktwolken bzw. von gerenderten Oberflächen der Merkmale bzw. des Defekts 14. Weiters ermöglicht dies eine Festlegung von Intensitätswerten, wenn die Ergebnisdaten in einem dreidimensionalen, kartesischen Gitter mit impliziten Koordinaten (Volumenpixel, kurz „Voxel“) vorliegen sollen. Hierbei werden die Ersatzmerkmalspositionen relevanter Datenpunkte durch Interpolation in das Gitter übertragen.

[0061] Durch die systematische Positionierung der Ersatzmerkmale 43 im globalen Koordinatensystem können in einem nachgelagerten Schritt weitere Rekonstruktions- und Segmentierungsverfahren eingesetzt werden, die eine genauere Lokalisierung und Visualisierung der Bauteilmerkmale 14 ermöglichen. Die Einbringung geometrischer (Oberflächenpunkte, Normalenrichtungen, Vorabinformationen zu den Merkmalen des Prüflings 2 wie Orientierung, Größe und Form) und materialspezifischer Zusatzinformationen ermöglicht es außerdem bekannte Verfahren auf Basis von Superposition, Triangulation, Lateration, Regression und Machine Learning anzuwenden.

[0062] Anhand der Fig. 6 und 7 wird nachfolgend das Verfahren zur thermografischen Rekonstruktion des Defekts 14 näher erläutert.

[0063] Die Fig. 6 veranschaulicht die Auswerteprozedur zur Rekonstruktion eines Defekts 14 und zur Bestimmung von Materialparametern des Prüflings 2. Die Darstellung a) zeigt beispielgebend einen defektbehafteten Prüfling 2, wobei die thermische Effusivität des Grundmaterials e_2 größer ist als die thermische Effusivität des Defektmaterials e_1 . Diagramm b), „Gemessenes Temperatursignal“, zeigt ein charakteristisches Temperatursignal 51 für eine Messung im Reflexionsmodus im Defektbereich. Im Diagramm d), „Spiegelquellenverteilung“, ist die daraus berechnete Spiegelquellenverteilung 52, mit einem Fehlstellenmerkmal 55, einem Vorderwandmerkmal 56, einem Merkmal aufgrund von Konvektion 57 und einem Rückwandmerkmal 58, dargestellt. Diagramm c), „Merkmalextraktion“, zeigt die extrahierten Defekt- und Bauteilmerkmale 55, 58. Im Diagramm e), „Berechnetes Kontrast-Temperatursignal“, ist das daraus berechnete Defekttemperatursignal 53 als reines Fehlstellenmerkmal 55 (durchgezogene Kurve) und das Fehlstellenmerkmal 55 gemeinsam mit dem Rückwandmerkmal 58 (strichlierte Kurve) dargestellt. Und Diagramm f), „Ersatz-Fehlstellenmerkmal“, zeigt die korrigierte Tiefenverteilung 54 der Spiegelquellen, mit dem Fehlstellenmerkmal 55 und dem Rückwandmerkmal 58. Die Darstellungen g), „2D Spiegelquellenverteilung“, und h), „2D Ersatz-Fehlstellenmerkmal“, zeigen eine 2D-Visualisierung der extrahierten Defekt- und Bauteilmerkmale und der korrigierten Tiefenverteilung 54 der Spiegelquellen 52.

[0064] Die beschriebenen Verfahrensschritte entsprechen den bereits in der Fig. 4 vorgestellten Maßnahmen. Die Ausprägung von Bauteilmerkmalen des Prüflings 2 hängt von den thermischen Impedanzen des Grundmaterials und des Defektmaterials ab, wobei die thermischen Impedanzen durch die jeweiligen Effusivitäten gebildet werden, die wiederum von der Wärmeleitfähigkeit k , der spezifischen Wärmekapazität c_p und der Materialdichte ρ abhängen (Fig. 6a). Je größer der Unterschied der thermischen Impedanzen, desto stärker werden die charakteristischen Bauteilmerkmale des Prüflings 2 angezeigt. Da die Position der Bildpunkte im Raum zueinander bekannt ist, können die individuellen Merkmalsintensitäten und -positionen durch eine geeignete Überlagerung für eine genauere Merkmalslokalisierung und -quantifizierung herangezogen werden. Bauteilmerkmale unter der Oberfläche 13 des Prüflings 2, die beispielsweise durch eine Defektgrenzfläche abgebildet werden, können aufgrund ihrer räumlichen Ausdehnung in mehreren nebeneinander liegenden Bildpunkten auftreten, wobei zugleich eine Verzerrung der räumlichen Ausdehnung durch die Wärmediffusion stattfindet. Die Fig. 6b zeigt exemplarisch ein gemessenes Oberflächentemperatursignal 51 als Funktion der Zeit für die Reflexions- (Pulse-Echo)-Konfiguration (Anregungsquelle 3 und Infrarotdetektor-Array 4 auf gleicher Seite) basierend auf einem sehr kurzen Anregungsimpuls in Form einer Dirac-Delta-Verteilung bezüglich der Zeit.

[0065] Die beschriebene Prozedur für die thermografische Defektrekonstruktion ist jedoch auf alle zeitlichen und örtlichen thermischen Anregungsfunktionen, sowie auch im Falle einer Transmissions-Konfiguration (Anregungsquelle 3 und Infrarotdetektor-Array 4 auf gegenüberliegenden Seiten) anwendbar.

[0066] Um sicherzustellen, dass alle relevanten Bauteilmerkmale erfasst werden, kann eine Testmessung durchgeführt werden. Mit einer Testmessung kann die thermische Diffusionszeit t_d und damit die Messzeit t_{mess} bestimmt werden.

[0067] Das nach erfolgter thermischer Anregung gemessene Temperatursignal 51 kann lokal, das heißt pixelweise, in eine entsprechende Spiegelquellendarstellung 52 transformiert werden.

Das Diagramm, dargestellt in Fig. 6d, veranschaulicht die berechnete Spiegelquellen-Verteilung 52 als Funktion der Tiefe w und offenbart die Merkmale des gemessenen Oberflächentemperatursignals 51 bezüglich Bauteilgrenzflächen und Defektgrenzflächen in der Form von Quellen (erkennbar durch positive Amplituden) und Senken (erkennbar durch negative Amplituden). Durch Extraktion der Amplituden aufgrund des Defekts 14 und der Rückwand erhält man schließlich das Diagramm wie in Fig. 6c dargestellt.

[0068] Aus dem so resultierenden Signal wird anschließend ein rauschfreies Defekttemperatursignal 53 berechnet. Durch die Auswertung des maximalen Defekttemperatursignals des gefilterten Defekttemperatursignals kann sodann die Defekttiefe genauer bestimmt werden. Dies wird durch die Darstellungen in den Fig. 6e und 6g erläutert, wobei das Diagramm in Fig. 6g einen Querschnitt durch die Oberfläche 13 des Prüflings 2 mit der entsprechenden Spiegelquellenverteilung 52 zeigt.

[0069] Aus der berechneten Defekttiefe kann sodann ein Ersatzspiegelquellensignal $I \in \mathbb{R}^{(N_u \times N_v \times N_w)}$ für jedes Kamerapixel und Defektsignal für eine mehrdimensionale Defektdarstellung bestimmt werden, wie es durch die Darstellungen in den Fig. 6f und 6h illustriert wird. Bei dem Beispiel gemäß Fig. 6 ist voraussetzungsgemäß die thermische Effusivität des Grundmaterials e_2 größer als die thermische Effusivität des Defektmaterials e_1 .

[0070] In der Fig. 7 ist die Auswerteprozedur zur Rekonstruktion von Defekten 14 und zur Bestimmung von Materialparametern veranschaulicht. Dabei ist - im Unterschied zu dem durch Fig. 6 behandelten Fall - die thermische Effusivität des Grundmaterials e_2 kleiner ist als die thermische Effusivität des Defektmaterials e_1 . Das Temperatursignal 51 wurde im Reflexionsmodus aufgezeichnet. Das Diagramm a), „Spiegelquellenverteilung“, zeigt die entsprechende Spiegelquellenverteilung 52 im Defektbereich, mit einem Fehlstellenmerkmal 55, einem Vorderwandmerkmal 56, einem Merkmal aufgrund von Konvektion 57 und einem Rückwandmerkmal 58. Diagramm b), „Merkmalsextraktion“, zeigt die extrahierten Defekt- und Bauteilmerkmale 55, 58 und Diagramm d), „Berechnetes Kontrast-Temperatursignal“, das daraus berechnete Defekttemperatursignal 53, mit dem reinen Fehlstellenmerkmal 55 (durchgezogene Kurve) und dem Fehlstellenmerkmal 55 gemeinsam mit dem Rückwandmerkmal 58 (strichlierte Kurve). In Diagramm f), „Ersatz-Fehlstellenmerkmal“, ist die korrigierte Tiefenverteilung der Spiegelquellen 52 wiedergegeben. Die Fig. 7 zeigt also ein Beispiel der thermografischen Defektrekonstruktion für einen Fall, wenn die Effusivität des Defektmaterials e_1 größer ist als die Effusivität des Grundmaterials e_2 . In diesem Fall ergibt sich auf der Tiefenskala zuerst eine Senke und dann eine Quelle (Fig. 7a und Fig. 7b).

[0071] Für eine konsistente Registrierung neuer Thermografiedaten und der Rekonstruktion von Bauteilmerkmalen des Prüflings 2 aus diesen Daten, werden die vom Oberflächenscanner 8 erfassten Geometriemerkmale (beispielsweise durch TOF-Kamera, Profil-Scanner, anhand der Vorrichtung selbst durch die Überlagerung von Bilddaten aus verschiedenen Posen) und die Lageschätzungen aus der inertialen Messeinheit 9 verwendet. Die Lageschätzung des Sensors im Ursprungskoordinatensystem erfolgt kontinuierlich.

[0072] Eine bevorzugte Ausführungsform der Vorrichtung 1 ist die eines handgeführten Geräts auf dem alle erforderlichen Komponenten in definierten, relativen Abständen zueinander positioniert sind.

[0073] In einer alternativen Ausführungsvariante der Vorrichtung 1 wird die räumliche Lage relativ zur Bauteiloberfläche bzw. der Oberfläche 13 des Prüflings 2 durch externe Datenquellen bereitgestellt, beispielsweise durch einen ein- oder mehrachsigen Roboter der die Vorrichtung 1 bewegt.

[0074] In einer weiteren alternativen Ausführungsform der Vorrichtung 1 wird die Oberfläche 13 des Prüflings 2 und die inertielle Lage der Vorrichtung 1 relativ zu der Oberfläche 13 durch externe Datenquellen bereitgestellt, beispielsweise durch ein CAD-Modell des Prüflings 2. In einer ebenfalls alternativen Ausführungsform bleibt die Vorrichtung 1 in Ruhe und der Prüfling 2 wird durch geeignete Einrichtungen bewegt. Die relative Lage der Vorrichtung 1 wird dabei durch die Manipulationseinrichtung des Prüflings 2 bestimmt und der Vorrichtung 1 für die Auswertung bereitge-

stellt.

[0075] Nachfolgend wird unter neuerlicher Bezugnahme auf die Darstellung der Vorrichtung 1 gemäß Fig. 1 eine weitere Anwendungsmöglichkeit bzw. Ausbildungsform der Vorrichtung zur thermischen Bauteilprüfung beschrieben. Dabei wird - den schon beschriebenen Verfahrensschritten vorausgehend - zu Beginn eine Identifikation des Prüflings 2 vorgenommen. Das heißt, dass die Steuervorrichtung 6 bzw. die Auswertevorrichtung 7 dazu ausgebildet ist, eine in irgendeiner Form codierte Kennung 15, die an der Oberfläche 13 des Prüflings 2 angebracht ist, zu erfassen bzw. automatisiert zu lesen. Dies ermöglicht eine spätere eindeutige Zuordnung der Ergebnisse der durchgeführten thermografischen Bauteilprüfung zu dem jeweiligen Prüfling 2. Als Grundlage dafür dienen Bilder die vorzugsweise von der Infrarotkamera bzw. von dem Infrarotdetektorarray 4 von der Kennung 15 gemacht worden sind. Alternativ ist es aber auch möglich, die für die Bauteilidentifikation erforderlichen Bilder mit Hilfe der optischen Kamera 11 aufzunehmen. Die Steuervorrichtung 6 bzw. die Auswertevorrichtung 7 ist zur programmgesteuerten Dekodierung der Bildinformationsdaten und Identifikation der Kennung 15 ausgebildet. Die Kennung 15 kann bei dieser Ausführungsvariante der Vorrichtung 1 durch optoelektronisch erfassbare Schriften oder ein- oder mehrdimensionale Codes (wie einen Strichcode oder einen QR-Code) gebildet sein.

[0076] In einer bevorzugten Ausbildungsform der Vorrichtung 1 ist in der Steuervorrichtung 6 eine programmgesteuerte Benutzerprüfung 16 vorgesehen. Bei dieser Ausbildungsvariante der Vorrichtung 1 ist es daher möglich, deren Inbetriebnahme auf einen dazu autorisierten Personenkreis zu beschränken. So kann beispielsweise eine Benutzerauthentifizierung durch Überprüfung eines von dem Benutzer über das Bedienterminal 10 eingegebenen Passworts erfolgen. Alternativ dazu kann eine Nutzerauthentifizierung auch auf der Grundlage von Technologien, wie einer Gesichtserkennung oder einer Augen-Iris-Erkennung erfolgen. Zur Aufnahme entsprechender Bilder stehen alternativ die Infrarotkamera bzw. das Infrarotdetektorarray 4 oder die optische Kamera 11 der Vorrichtung 1 zur Verfügung. Die programmgesteuerte Benutzerprüfung 16 der Vorrichtung 1 könnte alternativ auch auf Grundlage anderer Technologien wie dem Auslesen eines RFID-Elements mit entsprechenden Lesegeräten bzw. Scannern als auch der Erkennung von Fingerabdrücken erfolgen. Der jeweilig verwendeten Technologie entsprechend ist die Benutzerprüfung 16 der Vorrichtung 1 zur Bilderkennung oder zur Decodierung entsprechender Detektionssignale eines entsprechenden Lesegeräts ausgebildet.

[0077] Eine weiteres Ausführungsbeispiel der Benutzeridentifizierung könnte aber auch eine zwei- oder Mehrfaktorauthentifizierung vorsehen.

[0078] Anhand der Fig. 8 wird nachfolgend eine weitere Ausführungsvariante einer Vorrichtung 1 zur thermografischen Bauteilprüfung beschrieben. Die Fig. 8 zeigt eine Vorrichtung 1 zur zerstörungsfreien Bauteilprüfung eines Prüflings 2, die ebenfalls zwei Anregungsquellen 3 zur Erzeugung eines Wärmestroms in dem Prüfling 2 und eine Steuervorrichtung 6 mit einer Auswertevorrichtung 7 umfasst. Bei diesem Beispiel der Vorrichtung 1 sind zwei Infrarotdetektorarrays 4 zur Detektion bzw. Erfassung der von der Oberfläche 13 des Prüflings 2 emittierten Wärmestrahlung vorgesehen. Dies erlaubt eine kombinierte Auswertung der aus den jeweiligen Infrarotbildern der beiden Infrarotdetektorarrays 4 erhaltenen Oberflächentemperatursignale, wodurch in weiterer Folge eine größere örtliche bzw. zeitliche Auflösung erreicht werden kann.

[0079] Andererseits kann auch durch die Art der durch die Anregungsquellen 3 hervorgerufenen thermischen Anregung der Oberfläche 13 des Prüflings 2 eine Verbesserung der Qualität der mit dem Verfahren ermittelten Ergebnisse der Bauteilprüfung erreicht werden. Eine Möglichkeit dazu besteht darin, in dem jeweiligen Strahlengang der beiden Anregungsquellen 3 einen Filter 17 vorzusehen. Durch die beiden Filter 17 wird aus der von den beiden Anregungsquellen 3 erzeugten Infrarotstrahlung ein engerer Spektralbereich ausgewählt.

[0080] Eine andere Ausführungsvariante sieht vor, in dem Strahlengang der jeweiligen Anregungsquelle 3 jeweils eine Fokussiereinrichtung bzw. eine Fokussierlinse 18 vorzusehen. Die Fokussierlinsen 18 erlauben das Verfahren zur Bauteilprüfung derart durchzuführen, dass die thermische Anregung mit der Infrarotstrahlung auf der Oberfläche 13 des Prüflings 2 örtlich kon-

zentriert vorgenommen werden kann. Durch eine entsprechende Ausbildung bzw. Einstellung der Fokussierlinsen 18 kann beispielsweise der Wärmeeintrag auf einen möglichst punktförmigen oder linien- bzw. streckenförmigen Oberflächenbereich konzentriert werden. Für das anzuwendende Auswerteverfahren ist dies insofern von Vorteil, als die Anfangsbedingungen des in dem Prüfling 2 erzeugten Wärmestroms genauer bestimmt bzw. vorgegeben werden können.

[0081] Die Ausführungsbeispiele zeigen mögliche Ausführungsvarianten, wobei an dieser Stelle bemerkt sei, dass die Erfindung nicht auf die speziell dargestellten Ausführungsvarianten derselben eingeschränkt ist, sondern vielmehr auch diverse Kombinationen der einzelnen Ausführungsvarianten untereinander möglich sind und diese Variationsmöglichkeit aufgrund der Lehre zum technischen Handeln durch gegenständliche Erfindung im Können des auf diesem technischen Gebiet tätigen Fachmannes liegt.

[0082] Der Schutzbereich ist durch die Ansprüche bestimmt. Die Beschreibung und die Zeichnungen sind jedoch zur Auslegung der Ansprüche heranzuziehen. Einzelmerkmale oder Merkmalskombinationen aus den gezeigten und beschriebenen unterschiedlichen Ausführungsbeispielen können für sich eigenständige erfinderische Lösungen darstellen. Die den eigenständigen erfinderischen Lösungen zugrundeliegende Aufgabe kann der Beschreibung entnommen werden.

[0083] Sämtliche Angaben zu Wertebereichen in gegenständlicher Beschreibung sind so zu verstehen, dass diese beliebige und alle Teilbereiche daraus mitumfassen, z.B. ist die Angabe 1 bis 10 so zu verstehen, dass sämtliche Teilbereiche, ausgehend von der unteren Grenze 1 und der oberen Grenze 10 mit umfasst sind, d.h. sämtliche Teilbereiche beginnen mit einer unteren Grenze von 1 oder größer und enden bei einer oberen Grenze von 10 oder weniger, z.B. 1 bis 1,7, oder 3,2 bis 8,1, oder 5,5 bis 10.

[0084] Der Ordnung halber sei abschließend darauf hingewiesen, dass zum besseren Verständnis des Aufbaus Elemente teilweise unmaßstäblich und/oder vergrößert und/oder verkleinert dargestellt wurden.

BEZUGSZEICHENLISTE

1	Vorrichtung	57	Merkmal aufgrund von Kon-
2	Prüfling		vektion
3	Anregungsquelle	58	Rückwandmerkmal
4	Infrarotdetektor-Array		
5	Versorgungseinheit	100	Maßnahme
6	Steuervorrichtung	101	Abschnitt
7	Auswertevorrichtung	102	Abschnitt
8	Oberflächenscanner	103	Abschnitt
9	inertiale Messeinheit	111	Schritt
10	Bedienterminal	112	Schritt
11	Kamera	113	Schritt
12	optische Achse	114	Schritt
13	Oberfläche	115	Schritt
14	Defekt	116	Schritt
15	Kennung	117	Schritt
16	Benutzerprüfung		
17	Filtern		
18	Fokussierlinse		
41	Koordinatenpunkt p		
42	Normalvektor n_p		
43	ins Weltkoordinatensystem projizierter Ersatzmerkmals- punkt		
44	Ersatzmerkmal P		
51	Temperatur		
52	Spiegelquelle		
53	Defekttemperatursignal		
54	korrigierte Tiefenverteilung		
55	Fehlstellenmerkmal		
56	Vorderwandmerkmal		

Patentansprüche

1. Vorrichtung (1) zur thermographischen Bauteilprüfung, umfassend eine Anregungsquelle (3) zur Erzeugung eines instationären Wärmestroms in einem Prüfling (2), ein Infrarotdetektor-Array (4) zur Detektion einer von einer Oberfläche (13) des Prüflings (2) emittierten Wärmestrahlung, einen Oberflächenscanner (8), eine Steuervorrichtung (6) und eine Auswertevorrichtung (7), **dadurch gekennzeichnet**, dass die Vorrichtung (1) eine inertielle Messeinheit (9) zur Detektion von Bewegungen der Vorrichtung (1) umfasst, und dass die Auswertevorrichtung (7) zur programmgesteuerten Rekonstruktion eines Defekts (14) in einem Prüfling (2) ausgebildet ist, wobei durch die Auswertevorrichtung (7) aus Daten von Infrarotbildern von dem Infrarotdetektor-Array (4) ein Oberflächentemperatursignal T_{mess} berechnet wird, und wobei das Oberflächentemperatursignal T_{mess} unter Anwendung eines Regularisierungsverfahrens in eine Spiegelquellendarstellung T_{Sq} transformiert wird.
2. Vorrichtung (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Geometrieerfassungssystem zur Berechnung von räumlichen Koordinaten der Oberfläche (13) des Prüflings (2) ausgebildet ist.
3. Vorrichtung (1) nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Geometrieerfassungssystem zur Berechnung einer relativen räumlichen Lage zwischen der Vorrichtung (1) und dem Prüfling (2) ausgebildet ist.
4. Vorrichtung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Infrarotdetektor-Array (4) der Oberflächenscanner (8) und die inertielle Messeinheit (9) relativ zueinander in definierten Abständen und definierten Ausrichtungen in der Vorrichtung (1) angeordnet sind.
5. Vorrichtung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwei Infrarotdetektor-Arrays (4) zur Detektion der von einer Oberfläche (13) des Prüflings (2) emittierten Wärmestrahlung ausgebildet sind.
6. Vorrichtung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwei Anregungsquellen (3) ausgebildet sind.
7. Vorrichtung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Anregungsquelle (3) einen Filter (17) zur Selektion eines Teils eines Spektralbereichs der Infrarotstrahlung umfasst.
8. Vorrichtung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Anregungsquelle (3) eine Fokussierlinse (18) umfasst.
9. Vorrichtung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuervorrichtung (6) und/oder die Auswertevorrichtung (7) zur programmgesteuerten Identifikation des Prüflings (2) durch Decodierung einer an der Oberfläche (13) des Prüflings (2) angebrachten Kennung (15) ausgebildet ist.
10. Vorrichtung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Benutzerprüfungseinheit (16) umfasst ist und die Benutzerprüfungseinheit (16) zur programmgesteuerten Authentifizierung eines Benutzers ausgebildet ist, wobei eine Methode zur Authentifizierung des Benutzers verwendet wird, die aus einer Gruppe, umfassend das Eingeben eines Passworts, das Durchführen einer Gesichtserkennung oder einer Augen-Iris-Erkennung, das Detektieren eines Fingerabdrucks, das Auslesen eines RFID-Elements, oder das Auslesen einer mit einem Magnetstreifen versehenen Benutzerkarte, ausgewählt ist.
11. Verfahren zur thermographischen Bauteilprüfung eines Prüflings (2) mit einer Vorrichtung (1), umfassend eine Anregungsquelle (3), ein Infrarotdetektor-Array (4) einen Oberflächenscanner (8), eine Steuervorrichtung (6) und eine Auswertevorrichtung (7), mit den folgenden Verfahrensschritten:
 - Erfassen einer räumlichen Lage und Ausrichtung der Vorrichtung (1) relativ zu dem Prüfling (2) und Erfassen einer Oberfläche (13) des Prüflings (2) mit dem Oberflächenscanner (8);

- Erzeugen eines instationären Wärmestroms in dem Prüfling (2) durch die Anregungsquelle (3);
 - Aufzeichnen von Infrarotbildern der Oberfläche (13) des Prüflings (2) mit dem Infrarotdetektor-Array (4) während einer vorgewählten Messdauer;
 - Rekonstruktion einer räumlichen Position eines Defekts (14) aus erfassten Daten der Infrarotbilder durch die Auswertevorrichtung (7),
 - **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Rekonstruktion des Defekts (14) durch die Auswertevorrichtung (7) aus den Daten der Infrarotbilder ein Oberflächentemperatursignal T_{mess} berechnet wird,
 - und dass das Oberflächentemperatursignal T_{mess} in eine Spiegelquellendarstellung T_{Sq} transformiert wird, wobei gilt $T_{\text{mess}} = K T_{\text{Sq}}$, und wobei K eine Transformationsmatrix ist.
12. Verfahren nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass aus der Spiegelquellendarstellung T_{Sq} Ersatzspiegelquellen und/oder Ersatzmerkmale berechnet werden.
 13. Verfahren nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Berechnung der Ersatzspiegelquellen und/oder Ersatzmerkmale ein Regularisierungsverfahren oder ein Machine Learning-Ansatz angewendet wird.
 14. Verfahren nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass in dem Regularisierungsverfahren Green'sche Funktionen auf Basis der Wärmeleitungsgleichung angewendet werden.
 15. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei der Rekonstruktion der räumlichen Position des Defekts (14) eine Zusatzinformation aus einer Gruppe, umfassend eine Dimensionalität des Wärmeflusses, eine Anzahl von Grenzschichten in dem Prüfling (2), eine Position von Grenzschichten in dem Prüfling (2), thermophysikalische Materialeigenschaften oder Randbedingungen, verwendet wird.
 16. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass die räumliche Lage und die Ausrichtung von Vorrichtung (1) und Prüfling (2) relativ zueinander durch die inertielle Messeinheit (9) gemessen wird.
 17. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass zum Erfassen der räumlichen Lage und Ausrichtung der Vorrichtung (1) und zum Erfassen der Oberfläche (13) des Prüflings (2) externe Datenquellen berücksichtigt werden.
 18. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 17, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei dem Verfahrensschritt des Aufzeichnens der Infrarotbilder von der Oberfläche (13) des Prüflings (2) die Infrarotbilder von zwei Infrarotdetektor-Arraykameras (4) aufgezeichnet werden.
 19. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 18, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei dem Verfahrensschritt des Erzeugens eines Wärmestroms in dem Prüfling (2) durch die Anregungsquelle (3) von der Anregungsquelle (3) emittierte Infrarotstrahlung durch einen Filter (17) ein reduzierter Spektralbereich der Infrarotstrahlung selektiert wird.
 20. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 19, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei dem Verfahrensschritt des Erzeugens eines Wärmestroms in dem Prüfling (2) durch die Anregungsquelle (3) von der Anregungsquelle (3) emittierte Infrarotstrahlung durch eine Fokussiereinrichtung bzw. eine Fokussierlinse (18) in einer möglichst punktförmig und/oder linien- bzw. streckenförmig konzentrierten Weise auf die Oberfläche (13) des Prüflings (2) einwirkt.
 21. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 20, **dadurch gekennzeichnet**, dass Zusatzinformationen über die Bauteilgeometrie und die Materialeigenschaften des Prüflings (2) zur optimierten Diskretisierung des Rekonstruktionsraumes verwendet werden.
 22. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 21, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Verfahrensschritte ein- oder mehrmals wiederholt, aus einer unterschiedlichen räumlichen Lage und Ausrichtung der Vorrichtung (1) relativ zu dem Prüfling (2) durchgeführt werden und Ergebnisse von Rekonstruktionen der räumlichen Position des Defekts (14) superpositioniert werden.

23. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 22, **dadurch gekennzeichnet**, dass aus den Infrarotbildern temperatur- und ortskalibrierte Bilddaten berechnet werden.
24. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 23, **dadurch gekennzeichnet**, dass dem Verfahrensschritt des Erfassens der räumlichen Lage und Ausrichtung der Vorrichtung (1) relativ zu dem Prüfling (2) vorausgehend eine Bauteilidentifikation durch Erfassen einer an dem Prüfling (2) angebrachten Kennung (15) durchgeführt wird.
25. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 24, **dadurch gekennzeichnet**, dass dem Verfahrensschritt des Erfassens der räumlichen Lage und Ausrichtung der Vorrichtung (1) relativ zu dem Prüfling (2) vorausgehend eine Benutzerauthentifizierung durchgeführt wird, wobei die Benutzerauthentifizierung ein Verfahren umfasst, das ausgewählt ist aus einer Gruppe, umfassend das Eingeben eines Passworts, das Durchführen einer Gesichtserkennung oder einer Augen-Iris-Erkennung, das Detektieren eines Fingerabdrucks, das Auslesen eines RFID-Elements, oder das Auslesen einer mit einem Magnetstreifen versehenen Benutzerkarte.

Hierzu 6 Blatt Zeichnungen

Fig.1

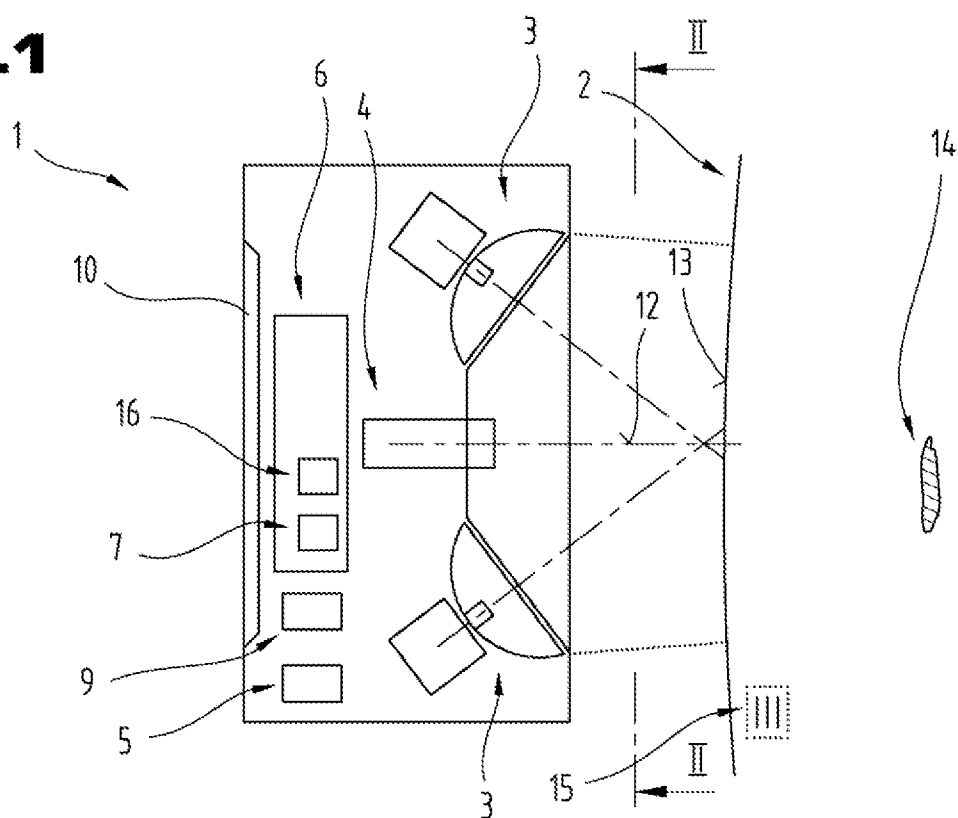


Fig.2

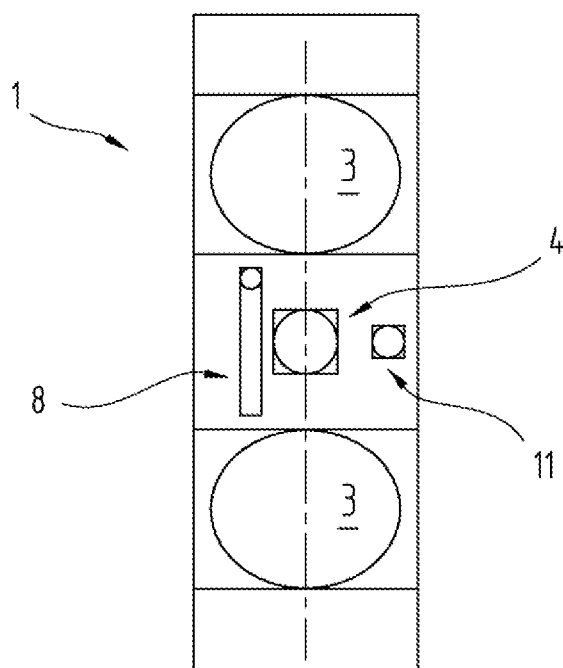


Fig.3

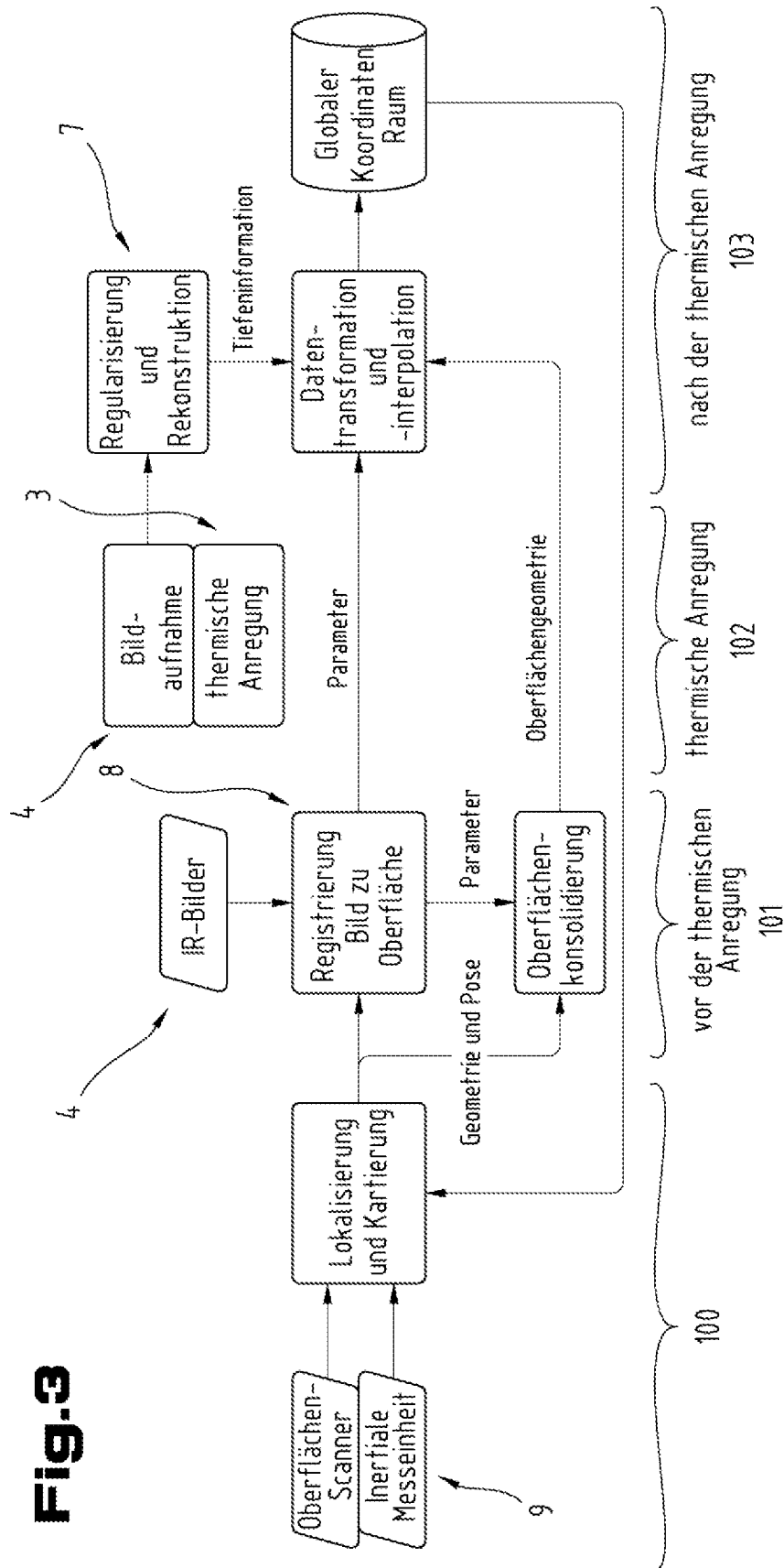


Fig.4

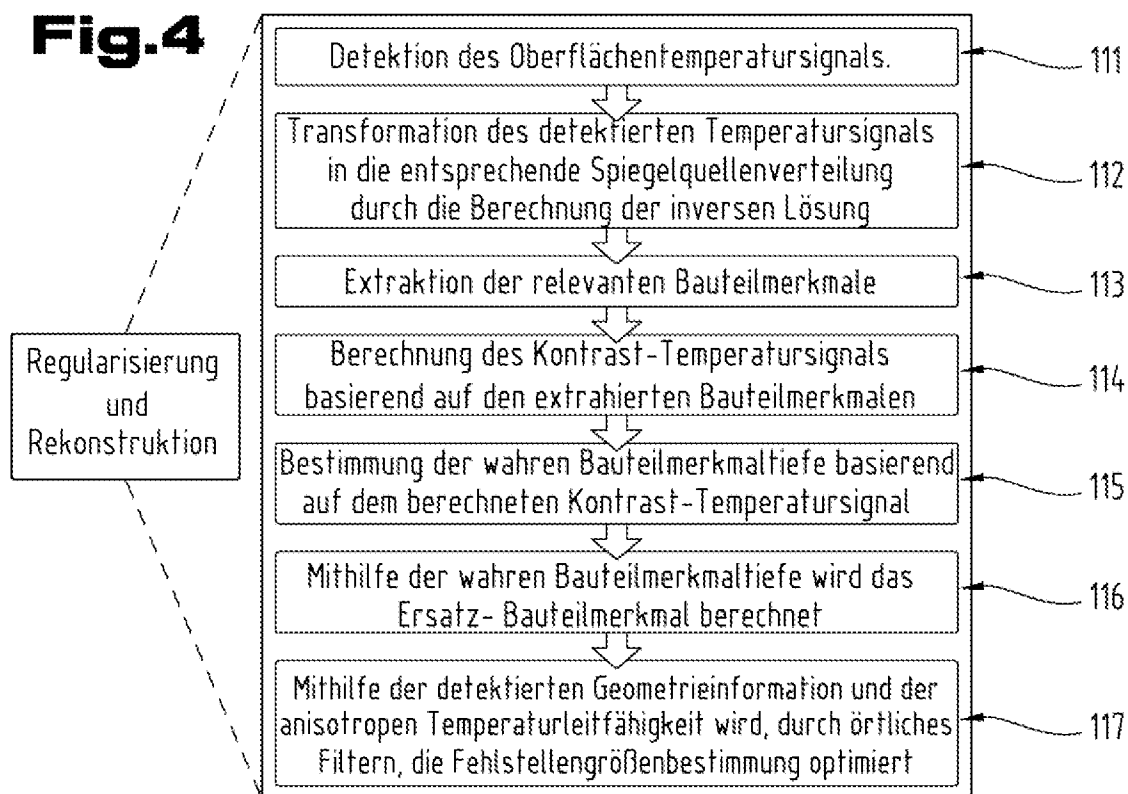


Fig.5

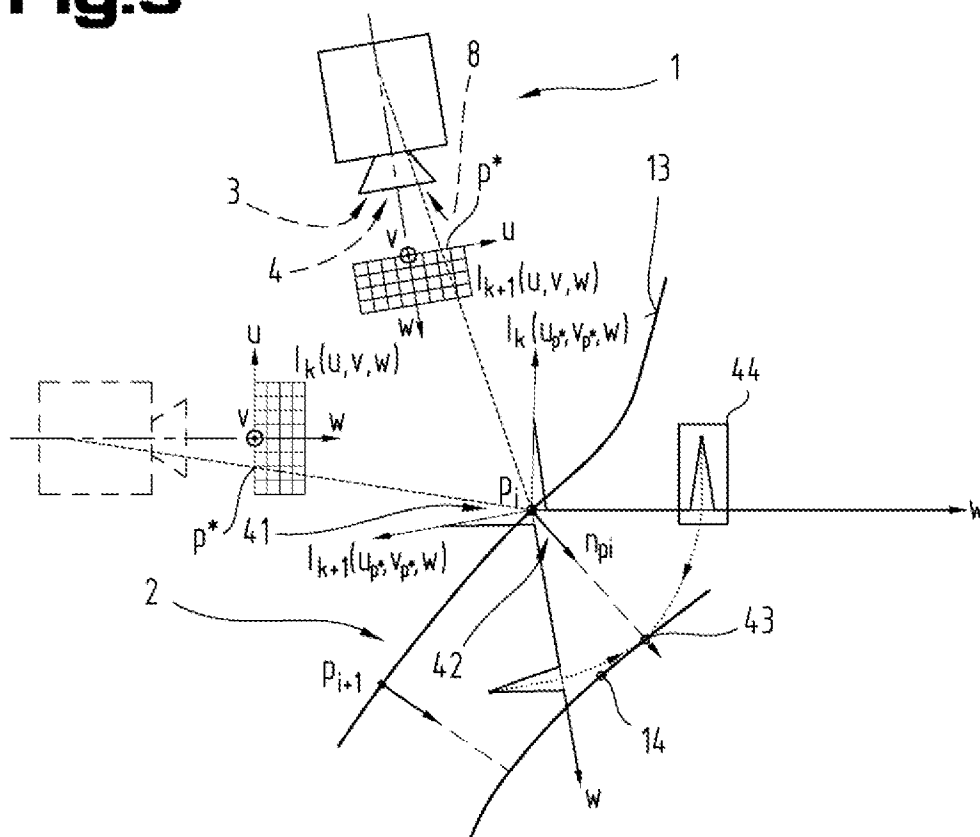


Fig.6

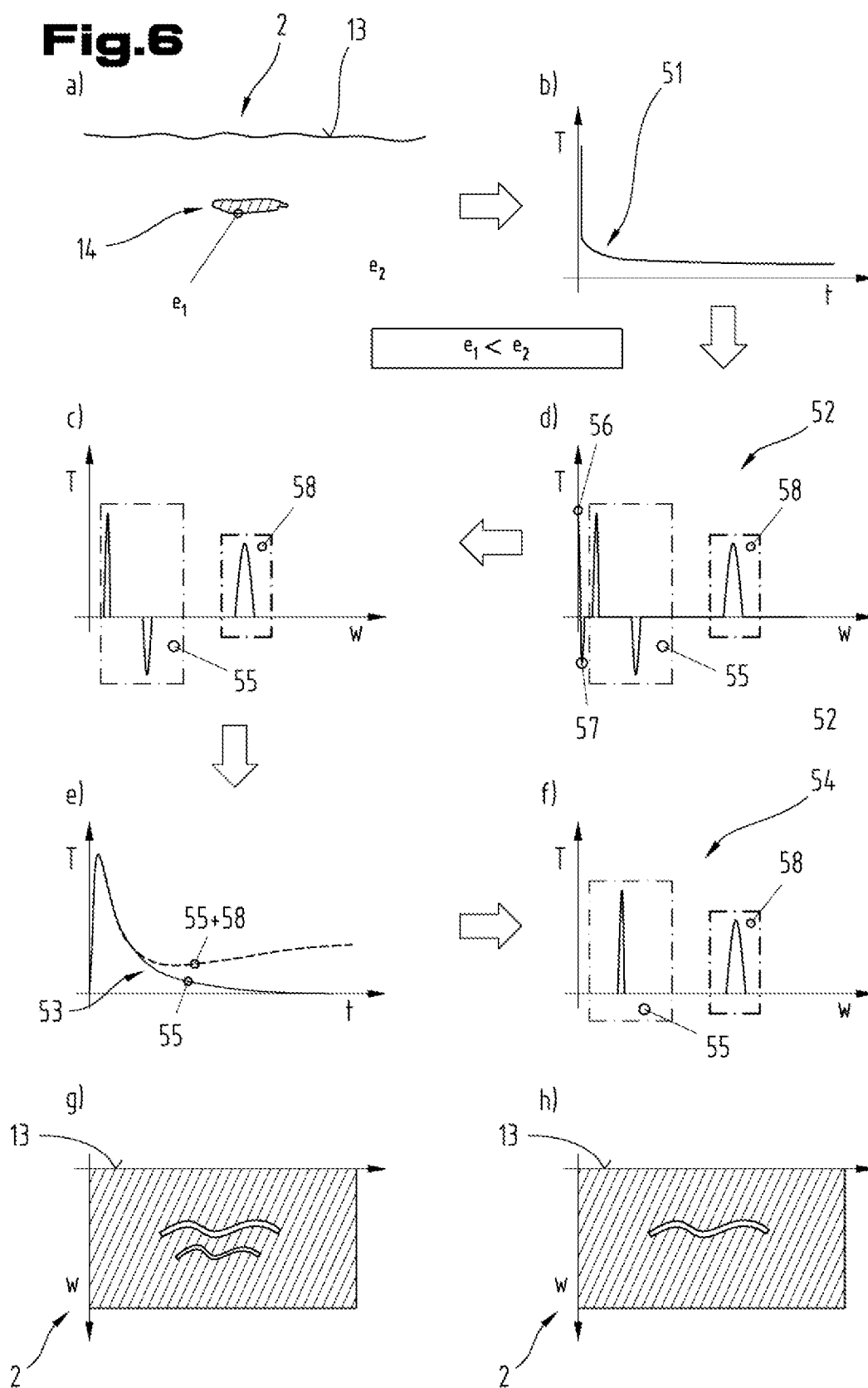


Fig.7

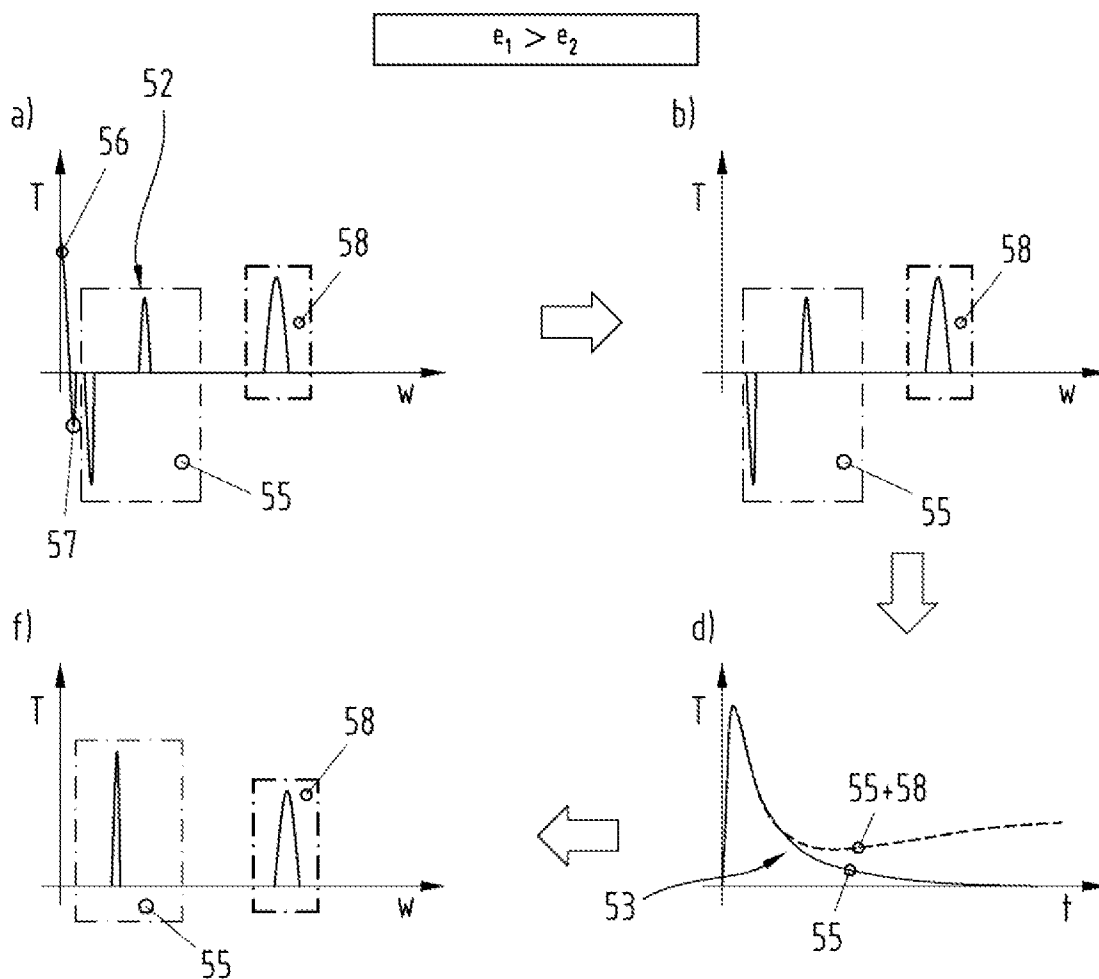


Fig.8

