

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
15. Oktober 2020 (15.10.2020)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2020/208155 A1**

- (51) Internationale Patentklassifikation:  
G01N 27/90 (2006.01) G01N 29/44 (2006.01)  
G01N 29/24 (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2020/060189
- (22) Internationales Anmeldedatum:  
09. April 2020 (09.04.2020)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:  
19168280.6 09. April 2019 (09.04.2019) EP  
19168531.2 10. April 2019 (10.04.2019) EP
- (71) Anmelder: ROSEN SWISS AG [CH/CH]; Obere Spichermatt 14, Stans, 6370 (CH).
- (72) Erfinder: DANILOV, Andrey; Trabweg 23, 49809 Lingen (DE). PEUSSNER, Matthias; Schweitzer-Weg 1, 49492 Westerkappeln (DE).
- (74) Anwalt: WISCHMEYER, André et al.; Großhandelsring 6, 49084 Osnabrück (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(54) Title: METHOD FOR DETERMINING THE GEOMETRY OF A DEFECT ON THE BASIS OF NON-DESTRUCTIVE MEASUREMENT METHODS USING DIRECT INVERSION

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DER GEOMETRIE EINER FEHLSTELLE AUF BASIS ZERSTÖRUNGSFREIER MESSVERFAHREN UNTER VERWENDUNG VON DIREKTER INVERSION

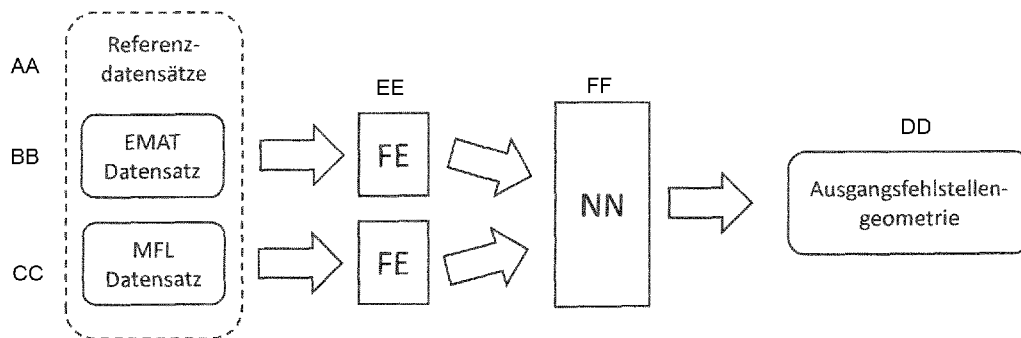


Fig. 1

- AA Reference datasets
- BB EMAT dataset
- CC MFL dataset
- DD Initial defect geometry
- EE Feature extractor
- FF Neural network

(57) Abstract: The invention relates to a method for determining the geometry of one or more physical, examined defects in a metal, in particular magnetisable, object, in particular a pipe or a tank, by means of at least two reference datasets of the object which are generated on the basis of various, non-destructive measurement methods, wherein the object is represented, at least in part, on, or by means of, an at least two-dimensional, preferably three-dimensional, object grid in an EDP unit, wherein an initial defect geometry is generated, in particular on the object grid or an at least two-dimensional defect grid, by inverting at least some of the reference



WO 2020/208155 A1

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

**Veröffentlicht:**

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

---

datasets, in particular by means of at least one neural network (NN) trained for this task, a predictive dataset is calculated on the basis of the initial defect geometry by means of a simulation routine for the non-destructive measurement method used when creating the reference datasets, at least some of the predictive datasets are compared with at least some of the reference datasets, and the method for determining the geometry of the defect is ended on the basis of at least one accuracy measurement, or the initial defect geometry is iteratively adapted to the geometry of the physical defect(s). The invention also relates to methods for determining a load-bearing limit.

**(57) Zusammenfassung:** Verfahren zur Bestimmung der Geometrie einer oder mehrerer realer, untersuchter Fehlstellen eines metallischen, insbesondere magnetisierbaren Objekts, insbesondere eines Rohres oder eines Tanks, mittels zumindest zweier auf Basis unterschiedlicher, zerstörungsfreier Messverfahren erzeugter Referenzdatensätze des Objekts, wobei das Objekt zumindest teilweise auf einem oder durch ein zumindest zweidimensionales, vorzugsweise dreidimensionales, Objektgitter, in einer EDV-Einheit dargestellt wird, wobei eine Ausgangsfehlstellengeometrie, insbesondere auf dem Objektgitter oder einem zumindest zweidimensionalen Defektgitter, durch Inversion von zumindest Teilen der Referenzdatensätze, insbesondere durch zumindest ein für diese Aufgabe trainiertes neuronales Netz (NN), erzeugt wird, auf Basis der Ausgangsfehlstellengeometrie durch eine Simulationsroutine jeweils ein Vorhersagedatensatz für die bei der Erstellung der Referenzdatensätze verwendeten zerstörungsfreien Messverfahren errechnet wird, ein Vergleich von zumindest Teilen der Vorhersagedatensätze mit zumindest Teilen der Referenzdatensätze erfolgt und in Abhängigkeit von zumindest einem Genauigkeitsmaß das Verfahren zur Bestimmung der Geometrie der Fehlstelle beendet wird oder eine iterative Anpassung der Ausgangsfehlstellengeometrie an die Geometrie der realen Fehlstelle(n) erfolgt sowie Verfahren zur Bestimmung einer Belastbarkeitsgrenze.

## **Verfahren zur Bestimmung der Geometrie einer Fehlstelle auf Basis zerstörungsfreier Messverfahren unter Verwendung von direkter Inversion**

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der Geometrie einer Fehlstelle sowie ein Verfahren zur Bestimmung einer Belastbarkeitsgrenze eines zumindest im Betrieb druckbelasteten Objekts.

Derartige Objekte werden mittels zerstörungsfreier Messverfahren auf Fehlstellen untersucht. Die Ergebnisse der Messverfahren werden ausgewertet, um auf die Art und/oder Größe von Fehlstellen zurückschließen zu können. Hiervon ausgehend kann dann bestimmt werden, wie stark das Objekt beispielsweise belastet werden kann oder ob und in welchem Umfang Reparaturmaßnahmen oder ein Austausch des Objekts nötig sind. Um unnötige Maßnahmen zu verhindern, kommt es darauf an, die Fehlstellen und ihre Geometrie möglichst genau beschreiben zu können.

Ein Beispiel für ein derart zu untersuchendes Objekt ist eine Pipeline. Eine der wesentlichen Aufgaben von Pipelineinspektionen, insbesondere mit sogenannten intelligenten Molchen ist die Vorhersage sicherer Betriebsbedingungen, die sich aus dem Zustand der Pipeline ergeben. Insbesondere interessiert Pipeline-Betreiber der Zustand etwaiger Schweißnähte und die Anzahl und Größe von Fehlstellen. Fehlstellen sind beispielsweise Bereiche mit Metallverlusten aufgrund von Korrosion, Rissen oder anderen Schwächungen einer Wand eines insbesondere zur Bevorratung oder

- 2 -

zum Transport von flüssigen oder gasförmigen Medien vorgesehenen Objekts.

Hierzu zählen beispielsweise Rohre, Pipelines oder Tanks.

Die Kenntnis des für eine Pipeline geltenden Maximaldrucks ("burst pressure"), ab dem die Pipeline zerstört wird, ist relevant für die in der Pipeline einstellbaren Betriebsdrücke. Der burst pressure wird zur quantitativen Bestimmung der Belastbarkeitsgrenze verwendet. Entsprechend ist die genaue Vorhersage dieses Drucks wichtig. Aktuell wird für die Berechnung dieses Grenzwerts eine Fehlstelle lediglich hinsichtlich ihrer Länge, Breite und Tiefe angenähert und mithin als Box betrachtet. Gerade für Metallverluste aufgrund von Korrosion auf der Außen- oder Innenseite einer Pipeline ist diese gebotene konservative Betrachtungsweise allerdings nachteilig, da die vereinfachten geometrischen Figuren die aktuelle Struktur der Fehlstelle notwendigerweise überschätzen. Dies führt zu der Unterschätzung des burst pressures des Objekts und somit zur Unterschätzung der erlaubten Betriebsdrücke. Ein mit höherem Druck betreibbares Objekt wie eine Pipeline oder ein Gastank kann jedoch deutlich ökonomischer betrieben werden.

Während MFL-Untersuchungen vorzugsweise für Auffinden von Fehlstellen aufgrund von Korrosion eingesetzt werden, werden weitere, insbesondere Ultraschall ausnutzende Verfahren für die Detektion von Rissen an der Innen- oder Außenseite eines Objekts eingesetzt. Zu diesen zerstörungsfreien Messverfahren zählen elektromagnetisch-akustische Verfahren (EMAT-Verfahren), bei denen aufgrund von Wirbelstrom-induzierten Magnetfeldern Schallwellen, insbesondere in Form von geführten

Wellen, in der Rohrwand des zu untersuchenden Objekts erzeugt werden, sowie direkt Ultraschall in die Objektwand einleitende Verfahren, nachfolgend Ultraschall-Verfahren genannt. Oberflächennahe, insbesondere kleinere Risse werden im Stand der Technik ebenfalls mit Wirbelstrom-Messverfahren, nachfolgend EC-Messverfahren genannt, gesucht.

Es ist Stand der Technik für die Messung der Korrosion eines Objekts Scans magnetischer Streufluss-Daten (MFL-Daten) aufgrund von magnetischen Streuflussmessungen (MFL-Messungen) zur Bestimmung der Größe der (Korrosions-) Fehlstellen von speziell geschulten Personen auswerten zu lassen. Gleiches gilt für die Auswertung von aufgrund von EMAT-, UT- und EC-Messverfahren gewonnen Messdaten. Die in den Scans angezeigten Signale werden in Boxen parametrisiert und ausgewertet. Die für dieses auch Sizing genannte Bewerten der Messergebnisse notwendigen Annahmen sind einerseits proprietär. Andererseits ist die Interpretation der Messergebnisse stark durch die Erfahrungswerte der auswertenden Personen beeinflusst. Letztlich kann die Qualität der Vorhersagen lediglich anhand von Untersuchungen der Pipeline vor Ort sichergestellt werden. Dies geht wiederum mit hohen Kosten für die Betreiber einher. Der meistverbreitete Industriestandard API 1163 beschreibt die nachteiligen Effekte dieses vereinfachten Ansatzes. Es ist gut dokumentiert, dass die Qualität dieses Ansatzes stark von der Kenntnis der betrachtenden Personen abhängt. Die in der Praxis durchgeführten Ansätze sind immer eine durch subjektive Faktoren beeinflusste Interpretation der durch einen Messlauf mit einem jeweiligen zerstörungsfreien Messverfahren erhaltenen Daten.

Besonders problematisch ist schließlich das gemeinsame Auftreten mehrerer Typen von Fehlstellen bzw. Defekten wie Korrosion und Cracks (Rissen), insbesondere in komplexeren Geometrien wie z.B. Schweißnähten. Vor dem Hintergrund immer höher werdender Anforderungen an die Sicherheit z.B. von Pipelines wird bei dem kombinierten Auftreten von Defekten mit hohen Sicherheitsabschlägen hinsichtlich des burst pressures gearbeitet. Eine Pipeline wird hierbei in der Regel deutlich unterhalb des maximal zulässigen Drucks betrieben.

Darüber hinaus sind aus der wissenschaftlichen, d.h. theoretischen Betrachtung Ansätze bekannt, bei denen über sukzessive Variation und iterative Methoden einer angenommenen Fehlstellengeometrie eine möglichst genaue Simulation der gemessenen Signale über Vorwärtsmodelle erreicht werden soll. Hierbei kommen beispielsweise neuronale Netze zum Einsatz. Theoretisch können diese Ansätze Lösungen im Sinn einer sich ergebenden Fehlstellengeometrie ergeben, allerdings sind diese Lösungen nicht notwendigerweise realistisch. Dies gilt insbesondere für komplexe Datensätze, die unter bestimmten Inversproblemen zu unerwarteten, exotischen und falschen Lösungen führen. Während in genau definierten und abgegrenzten Test-szenarien solche wissenschaftlichen Modelle eine Lösung des beschriebenen Problems in Form von Fehlstellengeometrien ergeben, ist dies für reale Messdaten, die eine Vielzahl von Störeinflüssen aufweisen, bislang noch nicht erfolgreich gewesen.

- 5 -

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, einen schnellen Weg zur Rekonstruktion der Geometrie einer realen Fehlstelle aufzuzeigen und eine möglichst genaue Berechnung der Belastbarkeitsgrenze eines mit einer oder mehreren Fehlstellen behafteten Objekts durchzuführen.

Die Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren gemäß Anspruch 1 sowie bezüglich der Bestimmung einer Belastbarkeitsgrenze, nämlich des burst pressures, durch ein Verfahren gemäß Anspruch 16. Vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung sind den auf diese Ansprüche rückbezogenen Unteransprüche sowie der nachfolgenden Beschreibung zu entnehmen.

Erfindungsgemäß ist vorgesehen, die Bestimmung der Geometrie einer oder mehrerer Fehlstellen mittels zumindest zweier über unterschiedliche, zerstörungsfreie Messverfahren erzeugte Referenzdatensätze des Objekts durchzuführen. Ein solches erfindungsgemäßes Verfahren zur Bestimmung der Geometrie einer oder mehrerer realer, untersuchter Fehlstellen eines metallischen und insbesondere magnetisierbaren Objekts, insbesondere eines Rohres oder eines Tanks, auf Basis zumindest zweier, über unterschiedliche, zerstörungsfreie Messverfahren erzeugter Referenzdatensätze des Objekts, umfasst eine zumindest teilweise Darstellung bzw. Abbildung des Objekts auf oder durch ein zumindest zweidimensionales, vorzugsweise dreidimensionales Objektgitter mittels einer EDV-Einheit. Erfindungsgemäß wird eine Ausgangsfehlstellengeometrie insbesondere auf dem Objektgitter oder einem zumindest zweidimensionalen Defektgitter durch Inversion von zumindest Teilen der

- 6 -

Referenzdatensätze, insbesondere durch zumindest ein für diese Aufgaben trainiertes neuronales Netz erzeugt. Die Ausgangsfehlstellengeometrie kann dabei direkt auf das Objektgitter abgebildet oder durch dieses dargestellt werden, sie kann jedoch ebenfalls in einer Parameterdarstellung, beispielsweise auf einem zumindest zweidimensionalen Defektgitter vorliegen. Die Bestimmung der Ausgangsfehlstellengeometrie erfolgt hierbei über eine direkte Inversion. Ausgehend von dem Ergebnis, den mittels der jeweiligen unterschiedlichen zerstörungsfreien Messverfahren ermittelten Referenzdatensätzen, die auf den Ergebnissen entsprechender Messungen basieren, wird auf die Geometrie zurückgeschlossen, die für die verwendeten unterschiedlichen zerstörungsfreien Messverfahren die entsprechenden Messergebnisse zur Folge hat. Für einfache Geometrien kann eine analytisch erhaltene inverse Funktion verwendet werden. Für komplexere Objektgeometrien bzw. Fehlstellengeometrien wird die Inversion jedoch vorzugsweise durch ein für diese Aufgabe trainiertes neuronales Netz vorgenommen. Hierzu kann das neuronale Netz Ausgabe erzeugen, die einem das Objekt repräsentierenden Objektgitter zugewiesen wird. Hierdurch werden Elementen des Objektgitters, Zellen oder Knoten, Informationen über das Vorliegen von Fehlstellen zugewiesen. In der Ausgabe können auch Informationen über die Art der Fehlstelle, wie beispielsweise Risse, Korrosionsdefekte oder Laminierdefekte enthalten sein und dem Objektgitter zugewiesen werden.

Weiterhin wird erfindungsgemäß eine Bestimmung, insbesondere eine Erzeugung jeweiliger, das heißt zum zerstörungsfreien Messverfahren passender Vorhersagedatensätze auf Basis der Ausgangsfehlstellengeometrie vorgenommen. Dies erfolgt durch Simulation mittels einer Simulationsroutine oder durch Zuweisung einer zum

jeweiligen Referenzdatensatz passenden Messung. Weiterhin werden zumindest Teile der Vorhersagedatensätze mit zumindest Teilen der Referenzdatensätze verglichen. In Abhängigkeit von zumindest einem Genauigkeitsmaß wird das Verfahren zur Bestimmung der Geometrie der Fehlstelle beendet oder es erfolgt zusätzlich eine iterative Anpassung der Ausgangsfehlstellengeometrie an der Geometrie der realen Fehlstelle(n). Somit kann die Geometrie der Fehlstelle oder zumindest eine erste Ausgangsfehlstellengeometrie für eine anschließende iterative Anpassung und Lösung auf eine besonders einfache und schnelle Weise erstellt werden.

Die Verwendung von zumindest zwei durch unterschiedliche zerstörungsfreie Messverfahren erhaltenen Referenzdatensätzen bei der Inversion erhöht die Zuverlässigkeit und die Genauigkeit des Verfahrens. Die Bestimmung einer Ausgangsfehlstellengeometrie, auf Basis derer für beide bzw. alle der Auswertung zugrundeliegende Referenzdatensätze Vorhersagedatensätze berechnet werden, die ausreichend mit den Referenzdatensätzen übereinstimmen, kann außer für einfachste Geometrien nicht durch eine analytisch gewonnene inverse Funktion erhalten werden. Bevorzugt wird für die Inversion daher zumindest ein neuronales Netz verwendet, das auf diese Aufgabe trainiert wurde.

Unterschiedliche zerstörungsfreie Messverfahren sind oftmals fehlstellenspezifisch, so dass sich durch die Verwendung zumindest zweier durch unterschiedliche, zerstörungsfreie Messverfahren erhaltener Referenzdatensätze insbesondere bei der Verwendung neuronaler Netze überraschende Synergieeffekte ergeben. Während

beispielsweise MFL-Messdaten oftmals korrosionsspezifische Fehlstellen detektieren und EMAT-Messverfahren eher für Rissdetektion verwendet werden, hat es sich gezeigt, dass sich durch die gemeinsame Verwendung entsprechender Referenzdatensätze nicht nur eine größere Komplexität etwaiger Fehlstellen beschreiben und bestimmen lässt, sondern dass darüber hinaus aus der theoretisch vorhandenen Vielzahl von Lösungen überraschenderweise Lösungen mit unsinnigen Geometrien häufiger vermieden werden. Zurückgeführt wird dies auf die sich durch das Training des insbesondere neuronalen Netzes ergebenden Synergieeffekte durch die Betrachtung desselben Objekts und entsprechend der identischen Fehlstellengeometrie.

Vorzugsweise generiert eine Trainingssimulationsroutine durch Simulationen auf Basis verschiedener Trainingsgeometrien Trainingsdaten, mit denen ein neuronales Netz zur Inversion der Messdaten trainiert wird. Als Trainingssimulationsroutine kann auch die Simulationsroutine verwendet werden. Die Trainingsgeometrien enthalten jeweils unterschiedliche Arten von Fehlstellen, die jeweils unterschiedlich ausgebildet sind bzw. unterschiedliche Formen und Dimensionen haben. Insbesondere sind hierbei sowohl Risse als auch Korrosionsfehlstellen enthalten. Weiterhin kann die Trainingssimulationsroutine auf Basis der Trainingsgeometrien Trainingsdaten für unterschiedliche Betriebsbedingungen der zerstörungsfreien Messverfahren simulieren. Beispielsweise können für eine Trainingsgeometrie unterschiedliche Trainingsdaten für unterschiedliche Messläufe des zerstörungsfreien Messverfahrens, beispielsweise mit unterschiedlichen Abständen des Sensors vom Objekt, simuliert werden. Trainingsdaten können auch für in unterschiedlichen Objektgeometrien enthal-

tene Fehlstellenform, beispielsweise für eine Anordnung in einer Schweißnaht, generiert werden. Trainingsdaten sind hierbei Datenpaare aus den Objektgeometrien bzw. den die Objektgeometrien repräsentierenden Objektgittern mit und/oder ohne Fehlstellen und den auf Basis der jeweiligen Geometrien erhaltenen Referenzdatensätzen.

Vorzugsweise wird das neuronale Netz auf Basis von Daten aus einer Datenbank, die simulierte Messungen enthält, trainiert. Durch die Verwendung von bereits simulierten Messungen wird der Aufwand für das Training des neuronalen Netzes reduziert, da es dann nur noch die eigentliche Anpassung des neuronalen Netzes und nicht auch noch zusätzlich die Simulation von Trainingsdaten umfasst. Zudem kann eine solche Datenbank eine Vielzahl von unterschiedlichen Trainingsfehlstellengeometrien, einschließlich beispielsweise solcher, die in Formen von Schweißnähten vorkommen, enthalten. Vorzugsweise sind in einer entsprechenden Datenbank Daten über besonders häufig vorkommende Geometrien und/oder Arten von Fehlstellen gehäuft enthalten. Durch die Verwendung von Daten einer derartigen Datenbank wird das neuronale Netz auf die Erkennung häufig vorkommender Fehlstellengeometrien besonders gut trainiert. Zur weiteren Vereinfachung des Trainings eines neuronalen Netzes kann als Ausgangspunkt ein bereits vortrainiertes neuronales Netz verwendet werden. Ein vortrainiertes neuronales Netz kann ebenfalls mit Datenbankdaten trainiert werden, das Training wird jedoch an einem geeigneten Zeitpunkt unterbrochen. Die Eigenschaften des vortrainierten neuronalen Netzes, wie die Gewichtungen der Verbindungen werden gespeichert. Ein weiteres späteres

- 10 -

Training eines vortrainierten neuronalen Netzes verwendet die gespeicherten Eigenschaften des Netzes als Ausgangspunkt.

Vorzugsweise werden aus der Simulation verschiedener Trainingsgeometrien erhaltene Trainingsdaten in eine derartige Datenbank eingepflegt. Hierdurch reduziert sich der Rechenaufwand, da Simulationen nicht mehrfach durchgeführt werden müssen.

Bevorzugt werden durch einen Feature Extractor, der auch als ein weiteres neuronales Netz ausgestaltet sein kann, aus einem Referenzdatensatz Eingangsdaten für das neuronale Netz extrahiert. Der Schritt der Extraktion von Eingangsdaten aus einem Referenzdatensatz ist besonders interessant für Messverfahren, die für jeden Messpunkt einen Vektor von Messdaten, beispielsweise in Form einer Zeitreihe, bestimmen. Um die Datenmenge in einem Eingangsvektor, der einem Eingangsgitterpunkt eines neuronalen Netzes zugewiesen wird, zu reduzieren, können aus den Vektoren von Messdaten der Referenzdatensätze die für die Bestimmung einer Fehlstellengeometrie relevantesten Daten ausgewählt werden. Vorzugsweise geschieht diese Auswahl über ein weiteres neuronales Netz. Dieses kann separat oder gemeinsam mit dem neuronalen Netz für die direkte Inversion trainiert werden. Dieses Vorgehen reduziert die im neuronalen Netz für die Inversion zu verarbeitende Datenmenge. Das Verfahren kann einfacher und schneller durchgeführt werden.

Vorzugsweise überführt das neuronale Netz Eingangsdaten mit einer zweidimensionalen Ortsauflösung in eine Ausgangsfehlstellengeometrie mit dreidimensionaler

Ortsauflösung. Hierzu wird bevorzugt ein neuronales Netz mit einem oder mehreren convolutional layer und/oder einem oder mehreren transposed convolutional layer verwendet. Eine Eingangsschicht des neuronalen Netzes weist hierzu eine zweidimensionale Ortsauflösung auf, wobei einem Eingangspunkt der Eingangsschicht ein Vektor mit mehreren Einträgen zugewiesen werden kann. Das neuronale Netz ist dazu eingerichtet, auf Basis dieser Eingangsdaten eine Ausgabe mit einer dreidimensionalen Ortsauflösung zu generieren, die als dreidimensionale Ausgangsfehlstellengeometrie verwendet oder weiter in eine entsprechende dreidimensionale Ausgangsfehlstellengeometrie überführt werden kann. Die dreidimensionale Ausgangsfehlstellengeometrie kann besonders einfach für die Berechnung eines Vorhersagedatensatzes durch die Simulationsroutine verwendet werden.

Insbesondere erfolgt eine Zuweisung der Ausgabe des neuronalen Netzes zu den Zellen des Objektgitters. Entsprechend der Ausgabe des neuronalen Netzes werden einzelne Zellen als fehlerstellenbehaftet oder fehlerstellenfrei gekennzeichnet. Aus dem erhaltenen Objektgitter mit generischer Fehlerstellenbeschreibung können dann beispielsweise einzelne Fehlerstellen, die durch Gruppen von zusammenhängenden fehlerstellenbehafteten Zellen repräsentiert werden, in eine parametrische Fehlerstellenbeschreibung auf einem Defektgitter überführt werden, was eine etwaige nachfolgende Betrachtung und Bearbeitung der Fehlerstellengeometrie vereinfacht.

Bevorzugt erfolgt eine Klassifikation von Fehlerstellen. Hierbei werden den erkannten Fehlerstellen fehlerstellenspezifische Informationen zugeordnet. Fehlerstellen können bei-

spielsweise unterschieden werden in Oberflächendefekte wie beispielsweise Korrosion und Defekte im Volumen wie beispielsweise Risse, Einschlüsse oder Laminierdefekte. Laminierdefekte sind hierbei Regionen, in denen einzelne das Objekt ausbildende Werkstoffe zumindest lokal nicht ausreichend miteinander verbunden sind. Hierdurch ist es möglich, die unterschiedlichen Arten von Fehlstellen, soweit nötig, in einer nachfolgenden iterativen Anpassung der Ausgangsfehlstellengeometrie durch unterschiedliche Fehlstellenmodelle zu beschreiben. Durch die zusätzlichen Informationen kann die Anpassung der Ausgangsfehlstellengeometrie in dem nachfolgenden iterativen Verfahren robuster sein, vereinfacht und/oder beschleunigt werden.

Unterschiedliche zerstörungsfreie Messverfahren sind die vorbezeichneten MFL-, EMAT-, UT-, und EC-Messverfahren. Das erfindungsgemäße Verfahren zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass als erster Referenzdatensatz ein Datensatz auf Basis eines MFL-, Wirbelstrom-, EMAT- oder Ultraschall-Messverfahrens und als zumindest weiterer Referenzdatensatz ein auf Basis eines weiteren aus dieser Gruppe von Messverfahren stammenden Messverfahrens erzeugter Datensatz verwendet wird. Sofern ein Messverfahren wie z.B. ein EMAT-Verfahren einen Datensatz mit mehreren Unterdatensätzen erzeugt, z.B. aufgrund mehrerer Signale aufzeichnende Sensoren, werden im Verfahren dann vorzugsweise alle Unterdatensätze verwendet. Im Fall von Referenzdaten, die mittels EMAT-Verfahren gewonnen wurden, handelt es sich bei den Referenzdatensätzen vorzugsweise um über die Zeit integrierte Amplituden („Counts“) an den jeweiligen Wandpositionen bzw. Messpositionen, die sogenannten A-Scans.

Vorzugsweise kommen zur gemeinsamen Betrachtung von insbesondere Korrosion und Rissen insbesondere Referenzdatensätze folgender Messverfahren zum Einsatz:

- a) ein erster Referenzdatensatz auf Basis einer MFL-Messung und als weiterer Referenzdatensatz auf Basis einer EMAT-Messung, oder
- b) ein erster Referenzdatensatz auf Basis einer MFL-Messung und als weiterer Referenzdatensatz auf Basis einer UT-Messung, oder
- c) ein erster Referenzdatensatz auf Basis einer MFL-Messung, als ein erster weiterer Referenzdatensatz einer auf Basis einer EMAT-Messung, und als ein zweiter, weiterer Referenzdatensatz einer auf Basis einer EC-Messung.

Die auf Basis von MFL-Messungen erzeugten Referenzdatensätze können vorzugsweise ergänzend differenziert sein hinsichtlich der Richtung der Magnetisierung, d.h. die Varianten a), b) oder c) können somit entweder einen Referenzdatensatz auf Basis einer MFL-Messung mit Magnetisierung in axialer Richtung (MFL-A-Messverfahren) oder auf Basis einer Messung mit Magnetisierung in Umfangsrichtung (MFL-C-Messverfahren) aufweisen. „Auf Basis“ eines bestimmten Messverfahrens gewonnene Referenzdatensätze stammen aus entsprechenden Messläufen („Scans“) und sind gegebenenfalls für eine automatisierte Bearbeitung im erfindungsgemäßen Verfahren aufbereitet, z.B. können sie hinsichtlich ihrer Werte normalisiert und/oder zwecks Anpassung an bestimmte Gittergeometrien interpoliert sein. Sie liegen insbesondere als zweidimensionale Datensätze mit jeweiligen Länge- oder Breite- bzw. Umfangsinformationen und diesen zugeordneten Messwerten vor.

Vorzugsweise erfolgt die iterative Anpassung der Ausgangsfehlstellengeometrie an die Geometrie der realen Fehlstellen durch wenigstens eine, vorzugsweise eine Mehrzahl von insbesondere im Wettbewerb zueinander stehenden Experten-Routinen mit jeweils zumindest einer eigenen Suchstrategie bzw. zumindest einem eigenen Algorithmus, die auf eine gleiche Ausgangsfehlstellengeometrie zurückgreifen. Die Experten-Routinen werden insbesondere parallel auf einer EDV-Einheit ausgeführt. Bei Verwendung einer einzigen Experten-Routine kann diese auf verschiedene Algorithmen zur Anpassung der Fehlstellengeometrie zugreifen.

In der bzw. den jeweiligen Experten-Routinen wird mittels wenigstens eines eigenen Algorithmus bzw. einer eigenen Suchstrategie und auf Basis der Ausgangsfehlstellengeometrie eine jeweilige Experten-Fehlstellengeometrie erzeugt.

Einen eigenen Algorithmus weist die Experten-Routine dann auf, wenn sich wenigstens einer der der Experten-Routine zur Verfügung stehenden Algorithmen zur Anpassung der Fehlstellengeometrie von den Algorithmen einer weiteren Experten-Routine zumindest teilweise unterscheidet. Vorzugsweise können stochastische Prozesse zur Differenzierung der Algorithmen unterschiedlicher Experten-Routinen verwendet werden. Jede Experten-Routine weist zumindest einen Algorithmus zur Anpassung der Fehlstellengeometrie auf, vorzugsweise stehen zumindest einer Experten-Routine mehrere Algorithmen zur Verfügung. Ebenfalls kann innerhalb einer Experten-Routine die Auswahl eines Algorithmus auf Basis stochastischer Prozesse erfolgen oder vorgegeben werden.

- 15 -

Vorzugsweise ist vorgesehen, dass auf Basis der jeweiligen Experten-Fehlstellengeometrie ein jeweiliger Experten-Vorhersagedatensatz, insbesondere durch Simulation oder Zuweisung einer zum jeweiligen Referenzdatensatz passenden Messung bestimmt wird, wobei die dem jeweiligen Experten-Vorhersagedatensatz zugrunde liegende Experten-Fehlstellengeometrie wenigstens einer, vorzugsweise mehreren und insbesondere allen der Experten-Routinen als neue Ausgangsfehlstellengeometrie zur weiteren Anpassung an die Geometrie der realen Fehlstelle bzw. der realen Fehlstellen zur Verfügung gestellt wird, wenn der jeweilige Experten-Vorhersagedatensatz dem jeweiligen Referenzdatensatz ähnlicher ist als der entsprechende Ausgangsvorhersagedatensatz und/oder eine die zumindest zwei Experten-Vorhersagedatensätze berücksichtigende Fitnessfunktion verbessert ist. Anschließend, d.h. für die in der Iteration nächsten Vergleiche der jeweiligen Experten-Fehlstellengeometrien mit der neuen Ausgangsfehlstellengeometrie, werden die zur neuen Ausgangsfehlstellengeometrie gehörende Experten-Vorhersagedatensätze als neue Ausgangsvorhersagedatensätze verwendet.

Ein Maß für die Ähnlichkeit kann auch über die Fitnessfunktion gebildet werden, so dass beispielsweise in einer Ausführungsvariante sogar dann eine neue Ausgangsfehlstellengeometrie von einer Experten-Routine für die weiteren Iterationsschritte bereitgestellt wird, wenn sich eine - dann allerdings wesentliche - Annäherung nur eines der simulierten oder zugewiesenen Experten-Vorhersagedatensätze an den jeweiligen Referenzdatensatz ergibt.

- 16 -

Ein einfacher Vergleich der Experten-Vorhersagedatensätze mit den Referenzdatensätzen auf Basis der Experten-Fehlstellengeometrie ergibt sich beispielsweise wie folgt:

$$E = \sum_i |Y_{cal}^i(x_1 \dots x_n) - Y_m^i|,$$

wobei  $Y_m^i$ - das (geometrisch in der Regel zweidimensional vorliegende Messdatensignal) des  $i$  – ten Messverfahrens und  $Y_{cal}^i$  – das simulierte Signal des zugehörigen Messverfahrens ist. Weiterhin werden als  $x_1 \dots x_n$  die über eine oder mehrere Experten-Routinen variierten Fehlstellengeometrien bezeichnet. Je kleiner E ist, desto besser entsprechen die berechneten Fehlstellengeometrien den tatsächlich vorliegenden.

Die iterative Anpassung mittels der Experten-Routinen erfolgt schließlich solange, bis ein Stopp-Kriterium erfüllt ist. Es werden bevorzugt auf Basis derselben Ausgangsfehlstellengeometrie erzeugte (zugewiesene oder insbesondere simulierte Experten-Vorhersagedatensätze) messmethodenspezifisch mit den jeweiligen Referenzdatensätzen verglichen und damit die Nachteile der aus dem Stand der Technik bekannten getrennten Auswertung vermieden. Im messmethodenspezifischen Vergleich wird z.B. ein simulierter EMAT-Scan mit dem auf Basis der realen Messung gewonnenen EMAT-Referenzdatensatz verglichen, ein simulierter MFL-Scan mit dem auf Basis der realen Messung gewonnen MFL-Referenzdatensatz verglichen, etc..

Durch den Zugriff auf dieselbe Fehlstellengeometrie und die Überlagerung der Geometrien verschiedener Defekte kann die Berechnung des burst pressures des untersuchten Objekts um zumindest 10% – 20% genauer erfolgen und z.B. eine Pipeline mit höheren Drücken betrieben werden. Außerdem muss aufgrund der automatisierten, kombinierten Betrachtung der Referenzdatensätze unterschiedlicher Messmethoden und der sich hieraus ergebenden verbesserten Beschreibung der Defektgeometrien seltener eine In-Augenscheinnahme des untersuchten Objekts z.B. durch Ausgrabung durchgeführt werden. Darüber hinaus wird über die kombinierte Auswertung auf Basis unterschiedlicher Messverfahren gewonnener Daten das Problem singulärer, lokaler Lösungen minimiert, d.h. die Bestimmung der Fehlstellengeometrie verhält sich robuster.

Bei den insbesondere im Wettbewerb zueinander stehenden Experten-Routinen werden vorzugsweise diejenigen hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Ressourcen der EDV-Einheit bevorzugt, die wie nachfolgend beschrieben erfolgreicher in der Annäherung an die realen Messdaten sind als andere im Wettbewerb bestehende Experten-Routinen. Ressourcen der EDV-Einheit sind insbesondere die CPU- oder GPU-Zeit und/oder die oder eine Priorisierung in der Speicherbelegung.

Vorteilhafterweise laufen die Experten-Routinen (auf der EDV-Einheit) dergestalt im Wettbewerb zueinander, dass die Verteilung der Ressourcen der EDV-Einheit, insbesondere in Form von Rechenzeit, an eine jeweilige Experten-Routine in Abhängigkeit einer Erfolgsquote, bei der insbesondere die Anzahl der von der Experten-Rou-

tine berechneten und für eine oder mehrere andere Experten-Routinen zur Verfügung gestellten Ausgangsfehlstellengeometrien berücksichtigt wird, und/oder in Abhängigkeit einer Reduktion einer Fitnessfunktion, bei der insbesondere die Anzahl der für die Reduktion erzeugten Experten-Vorhersagedatensätze berücksichtigt wird, erfolgt. Der Wettstreit der Experten-Routinen ergibt sich insbesondere dadurch, dass von dem als Überwachungsroutine ausgebildeten Programmteil den jeweiligen Experten-Routinen dann vermehrt Ressourcen insbesondere in Form von Rechenzeit, vorzugsweise CPU- oder GPU-Zeit zugewiesen wird, wenn diese erfolgreicher sind als andere Experten-Routinen. Erfolgreich ist eine Experten-Routine dann, wenn sie eine mit einer zum Referenzdatensatz passenderen beispielsweise simulierten EMAT-Messung versehene Fehlstellengeometrie gefunden hat, die den anderen Experten-Routinen zur Verfügung gestellt wird.

Hieraus kann sich zum Beispiel ergeben, dass einzelne, besonders erfolgreiche Experten-Routinen mehr als 50% der gesamten zur Verfügung stehenden Rechenzeit erhalten, was die Gesamtdauer des erfindungsgemäßen Verfahrens deutlich reduziert. Gleichzeitig kann programmseitig vorgegeben werden, dass keine oder einzelne der Experten-Routinen nicht unter einen bestimmten Prozentsatz an Rechenzeit gelangen, um das Problem von singulären und exotischen Fehlstellengeometrien bzw. -ergebnissen aus den einzelnen Routinen zu vermeiden. So kann für den Fall, dass eine bis dahin erfolgreiche Experten-Routine nur eine lokale und keine globale Lösung findet, ein Ausweg aus der ansonsten im Stand der Technik vorkommenden Blockade-Situation gefunden werden.

Die Anpassung mittels der Experten-Routinen erfolgt solange, bis ein Stopp-Kriterium erfüllt ist. Hierbei handelt es sich beispielsweise um einen residualen Unterschied bezüglich der gemessenen und simulierten Messdaten. Es kann sich auch um ein externes Stopp-Kriterium beispielsweise auf Basis der zur Verfügung stehenden Rechenzeit oder um eine insbesondere vorgebbare Anzahl von Iterationen oder eine insbesondere vorgebbare oder vorgegebene oder aus der zur Verfügung stehenden Rechenzeit bestimmte Rechenzeit handeln. Das Stopp-Kriterium kann auch eine Kombination dieser Kriterien sein.

Gemäß einer Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird zusätzlich das Objektgitter automatisiert aus den Referenzdatensätzen erzeugt. Zur Bestimmung des Objektgitters erfolgt zunächst auf Basis von zumindest Teilen der Referenzdatensätze eine Klassifizierung von anomaliefreien Bereichen und anomaliebehafteten Bereichen des Objekts, wobei insbesondere auf Basis von vorbekannten Informationen über das Objekt ein Ausgangsobjektgitter erstellt wird, unter Verwendung des Ausgangsobjektgitters Vorhersagedatensätze für die jeweiligen zerstörungsfreien Messverfahren errechnet werden, ein Vergleich von zumindest Teilen der Vorhersagedatensätze mit jeweiligen Teilen der Referenzdatensätze unter Ausschluss der anomaliebehafteten Bereiche erfolgt und in Abhängigkeit von zumindest einem Genauigkeitsmaß das Ausgangsobjektgitter als die Geometrie des Objekts beschreibendes Objektgitter verwendet wird oder mittels der EDV-Einheit eine iterative Anpassung des Ausgangsobjektgitters an die Geometrie des Objekts in den anomaliefreien Bereichen erfolgt.

- 20 -

Anomaliebehaftete Bereiche des Referenzdatensatzes sind hier räumliche Gebiete, den von benachbarten Gebieten signifikant abweichende Messdaten zugeordnet sind. Es wird davon ausgegangen, dass diese Anomalien auf Fehlstellen zurückzuführen sind. Anomaliefreie Bereiche sind hierbei vorzugsweise zusammenhängende Gebiete, in denen sich die durch das zerstörungsfreie Messverfahren gemessenen Messwerte nicht oder nur innerhalb eines gewissen Toleranzbereiches verändern, in denen der Gradient der Veränderung unterhalb bestimmter Grenzwerte bleibt, die Abweichung einzelner Messwerte von einem Mittelwert geringer als ein bestimmter Schwellenwert ist und/oder die Abweichung eines Mittelwerts in einem lokalen Bereich von angrenzenden lokalen Bereichen unterhalb eines Schwellenwertes ist.

Für die Bestimmung des Objektgitters kann gemäß der erfindungsgemäßen Weiterbildung ein Ausgangsobjektgitter erstellt werden, wobei vorbekannte Informationen über das Objekt, bei Pipelines beispielsweise der Pipelinedurchmesser sowie die Wandstärke, verwendet werden. Ausgehend von dem Ausgangsobjektgitter werden zum jeweiligen Referenzdatensatz passende Messungen simuliert. Anschließend erfolgt ein Vergleich von zumindest Teilen des Vorhersagedatensatzes mit zumindest Teilen des zumindest einen Referenzdatensatzes, wobei die anomaliebehafteten Bereiche des Referenzdatensatzes bzw. des Objektes in dem Vergleich ausgeschlossen werden. Wenn die verglichenen Daten ausreichend genau übereinstimmen, wird das Ausgangsobjektgitter als hinreichend genaue Repräsentation der tatsächlichen Form des defektfreien Objektes angesehen und kann als Grundlage für die Auswertung der Fehlstellen verwendet werden. Andernfalls findet in der EDV-

Einheit eine iterative Anpassung des Ausgangsobjektgitters an die Geometrie des Objektes in den anomaliefreien Bereichen statt.

Hierzu wird vorzugsweise ein neues Ausgangsobjektgitter erstellt und für dieses wiederum neue Vorhersagedatensätze errechnet. Ein Vergleich von zumindest Teilen der neuen Vorhersagedatensätze mit zumindest Teilen des zumindest einen Referenzdatensatzes unter Ausschluss der anomaliebehafteten Bereiche erfolgt solange, bis ein Objektstopp-Kriterium für die iterative Anpassung z.B. in Form eines Genauigkeitsmaßes erreicht wird. Das dann vorliegende Ausgangsobjektgitter wird als die Geometrie des Objekts beschreibendes Objektgitter verwendet.

Um ein Ausgangsobjektgitter zu erhalten, das das fehlerstellenfreie untersuchte Objekt im ausgewerteten Abschnitt oder in seiner Gesamtheit repräsentiert, findet vorzugsweise eine Interpolation oder Extrapolation von Informationen des Referenzdatensatzes und/oder Objektgitters von den anomaliefreien Bereichen in die anomaliebehafteten Bereiche statt. Es können beispielsweise nach der Klassifizierung der Referenzdatensätze in anomaliebehaftete und anomaliefreie Bereiche die Informationen aus den anomaliefreien Bereichen in die anomaliebehafteten Bereiche interpoliert und/oder extrapoliert werden und ein so erhaltener Hilfsreferenzdatensatz bei der Bestimmung des Objektgitters verwendet werden. Es ist auch denkbar, zunächst ein Objektgitter nur für die als anomaliefrei klassifizierten Bereiche zu erstellen. Dieses Objektgitter weist im Bereich der anomaliebehafteten Bereiche Lücken auf, die anschließend mittels Interpolation oder Extrapolation aus den anomaliefreien Berei-

chen geschlossen werden können. Auf diese Weise wird ein die Geometrie des Objektes repräsentierendes Objektgitter erhalten, das dann für weitere Analysen von Fehlstellen bzw. Fehlstellengeometrien in den anomaliebehafteten Bereichen verwendet werden kann.

Vorzugsweise erfolgt bei der Klassifizierung anomalfreier Bereiche der Referenzdatensätze eine Zuordnung eines anomalfreien Bereichs zu zumindest einem vordefinierten lokalen Element des Objektes. Dieses wird bei der Erstellung des Ausgangsobjektgitters verwendet bzw. in das Ausgangsobjektgitter eingefügt. Dieser Schritt vereinfacht das Erstellen eines Ausgangsobjektgitters. Wie oben geschildert, kann das mittels der zerstörungsfreien Messverfahren untersuchte Objekt Schweißnähte, Ein- und/oder Anbauten enthalten, oder eine anderweitig vorbekannte lokal modifizierte Geometrie aufweisen. Die Erstellung des Objektgitters kann erleichtert werden, wenn diese vorbekannten Informationen verwendet werden. Hierfür werden entsprechende Elemente, wie beispielsweise Schweißnähte, Anbauten wie Stützelemente, Klammern, Verstärkungselemente oder beispielsweise Opferanoden eines kathodischen Rostschutzes, sowie zu Reparaturzwecken angebrachte Sleeves in ihrer Form und/oder Ausdehnung vordefiniert. Die Messergebnisse der zerstörungsfreien Messverfahren sehen in diesen Bereichen naturgemäß anders aus, als in Bereichen einer unveränderten Wand des Objekts, beispielsweise der Pipelinewand bei Pipelines. Diese Änderungen sind jedoch gleichförmig und im Vergleich zu den meisten Fehlstellen großflächig. Weiterhin sind sie dadurch, dass die die Veränderung verursachenden Elemente in ihrer Lage bekannt sind, erwartbar.

Durch Vorgabe der lokalen Elemente kann in der Klassifizierung eine Erkennung durchgeführt werden, ob es sich hierbei beispielsweise um eine Schweißnaht oder um eine Stützstruktur handelt. Das so erkannte Element kann dann mit seiner bekannten generellen Form beziehungsweise generellen Abmessung bei der Erstellung des Ausgangsobjektgitters verwendet oder nachträglich an der entsprechenden Stellen in das Ausgangsobjektgitter eingeführt werden, um dieses an die tatsächliche Form des untersuchten Objektes anzupassen.

Besonders bevorzugt wird das jeweilige lokale Element, insbesondere in Form einer Schweißnaht, dabei mittels eines parametrischen Geometriemodells beschrieben. Hierdurch kann der Aufwand bei der Erstellung des Objektgitters deutlich reduziert werden. Hierzu werden die vorbekannten Informationen über das lokale Element verwendet. Über eine Schweißnaht kann beispielsweise bekannt sein, dass sie sich in Umfangsrichtung um das Objekt herum erstreckt und durch eine Schweißnahtbreite sowie eine Überhöhung ausreichend genau beschreiben lässt. Somit kann eine Anpassung eines vordefinierten parametrischen Geometriemodells eines lokalen Elements an die tatsächliche lokale Form des Objekts durch eine Variation nur weniger Parameter erfolgen. Das Verfahren zur Erstellung eines Objektgitters wird hierdurch wesentlich beschleunigt. Insbesondere bei einer iterativen Anpassung des Ausgangsobjektgitters kann eine Veränderung lediglich eines oder mehrerer Parameter des parametrischen Geometriemodells erfolgen. Die Variation einzelner Parameter kann zudem durch bestimmte Grenzwerte, innerhalb derer sie modifiziert werden können, begrenzt werden. Durch eine derartige Begrenzung kann die Gefahr

minimiert werden, physikalisch unsinnige Ergebnisse zu erhalten. Die Zuverlässigkeit des Verfahrens wird erhöht.

Insbesondere stehen einer Experten-Routine mehrere Algorithmen zur Anpassung der Experten-Fehlstellengeometrie zur Verfügung. Hierbei kann es sich um Ansätze aus dem Bereich des maschinellen Lernens, der stochastischen Optimierung, empirischer und/oder numerischer Modellfunktionen handeln. Insbesondere können in den Experten-Routinen auch Erfahrungswerte auswertender Personen verwertet werden. Vorzugsweise finden in einer oder mehreren Experten-Routinen wie vorbeschrieben fehlstellenspezifische Variationen statt, d.h. einzelne Algorithmen sind auf die Variation von Korrosion, Rissen und Laminierdefekten ausgelegt. So wird ein ausreichend diverser Ansatz erzeugt, mit dem alle Lösungen zielgerichtet und unter Wettbewerbsbedingungen berücksichtigt werden können.

Insbesondere stehen einer Experten-Routine mehrere Algorithmen zur Anpassung der Experten-Fehlstellengeometrie zur Verfügung. Hierbei kann es sich um Ansätze aus dem Bereich des maschinellen Lernens, der stochastischen Optimierung, empirischer und/oder numerischer Modellfunktionen handeln. Insbesondere können in den Experten-Routinen auch Erfahrungswerte auswertender Personen verwertet werden. Vorzugsweise finden in einer oder mehreren Experten-Routinen wie vorbeschrieben fehlstellenspezifische Variationen statt, d.h. einzelne Algorithmen sind auf die Variation von Korrosion, Rissen und Laminierdefekten ausgelegt. So wird ein ausreichend diverser Ansatz erzeugt, mit dem alle Lösungen zielgerichtet und unter Wettbewerbsbedingungen berücksichtigt werden können.

Vorteilhafterweise werden in den insbesondere im Wettbewerb zueinander laufenden Experten-Routinen unterschiedliche und fehlstellenspezifische Variationen zur Erzeugung der jeweiligen Experten-Fehlstellengeometrie vorgenommen, wobei insbesondere eine erste Experten-Routine zur Variation von Rissen, eine weitere zur Variation von Korrosion und/oder eine weitere zur Variation von Laminierdefekten vorgesehen ist. Laminierdefekte, die sich in Form von nicht miteinander verbundenen Schichten einer (Objekt-) Wand z.B. bei EC-Messungen störend auswirken und insbesondere von speziellen Moden der EMAT-Messung entdeckt werden, können so getrennt berücksichtigt werden und insbesondere für die Betrachtung der Restlebenszeit z.B. einer Pipeline unberücksichtigt bleiben.

Die eingangs gestellte Aufgabe wird weiterhin durch ein Verfahren zur Bestimmung einer Belastbarkeitsgrenze eines zumindest im Betrieb druckbelasteten und insbesondere als Öl-, Gas- oder Wasserpipeline ausgebildeten Objekts gelöst, wobei bei dem Verfahren ein eine oder mehrere Fehlstellen beschriebener Datensatz als Eingangsdatensatz in einer insbesondere als Vorwärtsmodellierung ausgebildeten Berechnung der Belastbarkeitsgrenze verwendet wird, wobei der Eingangsdatensatz zunächst gemäß dem vor- oder nachbeschriebenen Verfahren zur Bestimmung der Geometrie einer Fehlstelle erzeugt wird. Die vorteilhafte Darstellung der Fehlstellengeometrie, insbesondere als nicht-parametrisierte echte dreidimensionale Geometrie bzw. als zweidimensionale Fläche mit jeweiligen Tiefenwerten, macht bisher in der Industrie als notwendig vermutete Vereinfachungen überflüssig, so dass auch aus

diesem Grund eine Steigerung der Genauigkeit der Fehlstellenbestimmung als Ganzes in bisher nicht erreichbarer Weise gewährleistet wird.

War bisher die Genauigkeit auf die Angabe des Punktes der Maximaltiefe der Fehlstelle beschränkt, wird nun das gesamte Profil mit hoher Genauigkeit ermittelt. Typischerweise wird die Genauigkeit der Maximaltiefe auf das in Abhängigkeit der Messgenauigkeit erreichbare Maß reduziert, also etwa  $\pm 5\%$  der Wandstärke im Vergleich zu bisher etwa  $\pm 10\%$  der Wandstärke bei dem Sizing nach dem eingangs beschriebenen Stand der Technik. Allerdings erreicht die Vorhersage der Belastbarkeitsgrenze in Abhängigkeit von der Geometrie der Fehlstelle gerade für kritische Fälle in der Genauigkeit Steigerungen von beispielsweise bisher  $\pm 50\%$  auf nun  $\pm 5\%$ . Der erfindungsgemäße Vorteil liegt somit insbesondere in einer erstmalig erreichten adäquaten Darstellung der Fehlstellengeometrie, die genau diese Steigerung erst ermöglicht.

Weitere Vorteile und Einzelheiten der Erfindung können der nachfolgenden Figurenbeschreibung entnommen werden. Schematisch dargestellt zeigt:

Fig. 1: einen Ablauf eines Ausführungsbeispiels eines Verfahrens zur Erstellung einer Ausgangsfehlstellengeometrie,

Fig. 2: ein Verfahren zum Erstellen von Trainingsdaten eines neuronalen Netzes,

- Fig. 3: ein Ablaufdiagramm über die Funktionsweise des neuronalen Netzes.
- Fig. 4 eine schematische Darstellung einer Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens,
- Fig. 5 eine nähere Erläuterung eines Teils der Fig. 4,
- Fig. 6A – 6F Referenzdatensätze und Ergebnis eines erfindungsgemäßen Verfahrens im Vergleich mit einem zugehörigen Geometriescan,
- Fig. 7 ein Flussdiagramm eines Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen Verfahrens,
- Fig. 8 eine Veranschaulichung einer Parameter-Darstellung einer Schweißnaht.

Fig. 1 zeigt einen Teil eines Ausführungsbeispiels eines Verfahrens zur Bestimmung der Geometrie einer oder mehrerer realer untersuchter Fehlstellen. Aus einem kombinierten Datensatz, vorliegend umfassend Referenzdatensätze, die durch zwei unterschiedliche zerstörungsfreie Messverfahren (EMAT und MFL) gewonnen wurden, werden über jeweilige Feature Extraktoren (FE) Daten entnommen und in ein neuronales Netz (NN) übergeben. Die Feature Extraktoren (FE) können hierbei durch weitere neuronale Netze gebildet werden. Auf Basis dieser Daten wird über das neuronale Netz (NN) eine Ausgangsfehlstellengeometrie erzeugt, die den durch beide

bzw. alle durchgeführte zerstörungsfreie Messverfahren erhaltenen Referenzdaten-sätzen zugrunde liegen könnte. Hierzu wird dem neuronalen Netz (NN) ein Eingang zugewiesen, der in einem oder mehreren Vektoren bestehen kann, die eine zweidimensionale Ortsauflösung repräsentieren. Das neuronale Netz (NN) gibt einen Vektor aus, der eine dreidimensionale Ortsauflösung repräsentiert. Dieser kann einem Objektgitter zugewiesen werden, wobei einzelne Zellen des Objektgitters als fehlerbehaftet gekennzeichnet werden, z.B. durch die Zuweisung eines Wertes „keine Material“ oder „Material mit Fehlstelle“. Bei dieser Kennzeichnung kann zusätzlich vorzugsweise nach Art der Fehlstelle wie beispielsweise Risse, Korrosion oder Laminierdefekte unterschieden werden.

Fig. 2 zeigt das Erstellen von Trainingsdaten für ein entsprechendes neuronales Netzes (NN), sowie die Verwendung dieser Daten für das Training. Aus einer generischen Beschreibung der Fehlstelle 30 auf einem Objektgitter werden in Schritt 31 die mittels eines zerstörungsfreien Messverfahrens auf einer entsprechenden Fehlstellengeometrie erhaltenen Messdaten 32 simuliert oder aus einer Datenbank zugewiesen. Diese liegen mit einer zweidimensionalen Ortsauflösung vor. Das neuronale Netz (NN) weist eine Eingangsschicht (ES) auf, deren Eingangspunkte eine zweidimensionale Ortsauflösung repräsentieren. Das neuronale Netz (NN) ist eingerichtet, eine Ausgabe mit dreidimensionaler Ortsauflösung zu generieren, die als generische Fehlstellenbeschreibung 30 verwendet oder in einer solche überführt wird. Einzelne Daten der Messdaten 32 werden den einzelnen Gitterpunkten der Eingangsschicht des neuronalen Netzes zugewiesen (Schritt 34). Gleichzeitig wird aus der generi-

schen Fehlstellenbeschreibung die Lage der Fehlstellen auf dem Objektgitter entnommen. Hierbei werden diejenigen Zellen, in die oder durch die sich die Fehlstellen erstrecken, als fehlstellenbehaftet markiert. Dies geschieht durch Zuweisung eines entsprechenden Wertes. Jede Zelle des Objektgitters wird mit der entsprechenden Information, ob diese mit einer Fehlstelle behaftet ist, sowie gegebenenfalls der Art der Fehlstelle der Ausgangsschicht des neuronalen Netzes zugewiesen (Schritt 33). Mit diesen Datenpaaren wird das neuronale Netz in Schritt 37 trainiert. Ein Training des neuronalen Netzes kann dann beispielsweise durch Vergleich der aus den der Eingangsschicht (ES) zugewiesenen Daten folgenden Ausgabe mit den entsprechenden der Ausgangsschicht des neuronalen Netzes zugewiesenen Daten und eine Anpassung von Gewichtungsfaktoren im neuronalen Netz durch backpropagation erfolgen. Auf diese Weise wird das neuronale Netz (NN) mit einer Vielzahl von Trainingsdatensätzen trainiert. Wenn die Feature Extraktoren (FE) ebenfalls als neuronale Netz eingerichtet sind, kann deren Training gleichzeitig auf Grundlage der gleichen Trainingsdaten erfolgen.

Fig. 3 zeigt die Auswertung von Messdaten eines zerstörungsfreien Messverfahrens mittels des neuronalen Netzes (NN). Messwerte der durchgeführten zerstörungsfreien Messverfahren werden den Eingangspunkten der Eingangsschicht (ES) des neuronalen Netzes (NN) zugewiesen (Schritt 34). Bei den Messwerten handelt es sich um Messwerte aus einem oder mehreren Referenzdatensätzen. Das neuronale Netz (NN) erzeugt in Schritt 35 ein Ausgabe, die dreidimensionale Ortskoordinaten repräsentiert. Diese Ausgabe wird für die Erstellung einer generellen Defektbeschrei-

- 30 -

bung, vorliegend in Form einer Ausgangsfehlstellengeometrie verwendet. Hierzu erfolgt in Schritt 36 eine Zuweisung der Ausgabe des neuronalen Netzes zu den Zellen des Objektgitters 30. Entsprechend der Ausgabe des neuronalen Netzes werden einzelne Zellen als fehlstellenbehaftet oder fehlstellenfrei gekennzeichnet. Zusätzlich können gegebenenfalls Informationen über die Art der jeweiligen Fehlstelle, z.B. Riss, Korrosion, Laminierdefekt, zugewiesen werden. Aus dem erhaltenen Objektgitter mit generischer Fehlstellenbeschreibung können dann beispielsweise einzelne Fehlstellen, die durch Gruppen von zusammenhängenden fehlstellenbehafteten Zellen repräsentiert werden, in eine parametrische Fehlstellenbeschreibung auf einem Defektgitter überführt werden.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird gemäß einem Ausführungsbeispiel die Oberfläche eines Rohres durch eine 2D Mesh-Oberfläche dargestellt. Die Fehlstellengeometrie kann parametrisiert als Vektor von Tiefenwerten  $D$  beschrieben werden, die auf einem Defektgitter liegen. Diese Fehlstellengeometrie wird auf Basis eines Ergebnisses für eine zu der jeweiligen Geometrie gehörenden Mess- und Simulationsdaten berücksichtigenden Fitnessfunktion  $F(x_1 \dots x_n)$  mit der Ausgangsfehlstellengeometrie verglichen. Hierbei wird angenommen, dass je geringer der Wert einer Fitnessfunktion ist, desto näher die angenommene Experten-Fehlstellengeometrie an der realen Geometrie ist:

$$F(x_1 \dots x_n) = \sum_i \|Y_{cal}^i(x_1 \dots x_n) - Y_m^i\| + R(x_1 \dots x_n)$$

Hierbei ist  $i$  die Anzahl der gleichzeitig zu behandelnden Datensätze (reale bzw. simulierte-Datensätze),  $Y_{cal}^i$  das Ergebnis einer Simulation der entsprechend  $i$ -ten Messung,  $Y_m^i$  sind die gemessenen Daten der jeweiligen Referenzdatensätze, und  $R(x_1 \dots x_n)$  ist ein Regularisierungsterm, der bei Mehrdeutigkeiten z.B. aufgrund mehrerer Minima eingesetzt werden und wie folgt angesetzt werden kann:

$$R(x_1 \dots x_n) = \alpha \|(x_1 \dots x_n)\|,$$

wobei  $\alpha$  ein Skalierungsterm ist.

Der Verfahrensablauf gemäß einer Weiterbildung ist zumindest abschnittsweise nachfolgend gemäß Fig. 4 beschrieben, wobei eine Mehrzahl der parallel und im Wettbewerb stehenden Experten-Routinen 11 lediglich mit einem Block 14 beschrieben ist.

Als Eingangsdatensätze können beispielsweise mehrere Läufe desselben MFL-Pipelinemolches gemäß Box 2 zusammengeführt werden. Beide Datensätze 1 können zwecks besserer Zusammenführung vorher gefiltert werden und aneinander angeglichen werden (Verfahrensschritt 3), beispielsweise um etwaige Artefakte oder Hintergrundrauschen zu reduzieren. Darüber hinaus wird ein weiterer Datensatz 4 auf Basis eines weiteren Messverfahrens als zusätzlicher Referenzdatensatz in der zugehörigen Box 3 aufbereitet und zwecks Angleichung an identische Gitterstrukturen gefiltert, verwendet, so dass gemäß Verfahrensabschnitt 6 zwei angegliche Referenzdatensätze, die auf Basis von verschiedenen zerstörungsfreien Messmethoden geschaffen wurden, vorhanden sind.

- 32 -

Genau aneinander angepasste Datensätze können gemeinsam behandelt werden, wobei das erfindungsgemäße Verfahren die gleichzeitige Behandlung der Datensätze durch Verwendung einer Fitnessfunktion, die die zusammen zu betrachtenden Datensätze berücksichtigt, realisiert.

Im Schritt 7 wird auf die in Schritt 6 vorhandenen Referenzdatensätze zugegriffen, wozu in Schritt 8 zunächst eine anfängliche Fehlstellengeometrie als Ausgangsfehlstellengeometrie bestimmt wird. Dies erfolgt wie vorgeschrieben auf Basis eines neuronalen Netzwerkes, in welches die Referenzdatensätze als Eingangsdatensätze eingelesen werden.

Die Lösung des neuronalen Netzwerkes wird dann als eine oder mehrere Ausgangsfehlstellengeometrien  $x_1 \dots x_n$  für die einzelnen Expertenmodule zur Verfügung gestellt. Vorab kann mit dem Ziel einer Reduzierung der Rechenzeit die Anzahl der Parameterwerte, die die Fehlstellengeometrien beschreiben, so klein wie möglich gehalten werden. Dies wird beispielsweise über eine dynamische Gitteranpassung erreicht. Da die Anzahl der Tiefenwerte der Anzahl der Knotenpunkte im Defektgitter 5 entspricht, kann die Anzahl der Knoten gleichzeitig auch die Anzahl der Fehlstellenparameter sein. Beginnend bei einem vergleichsweise groben Gitter wird dieses sukzessive in relevanten Bereichen verfeinert.

Beispielhaft kann für einen vorgegebenen Knotenpunktabstand von beispielsweise 14 mm, einer hiermit einhergehenden Gitterzellengröße von 14 mm x 14 mm und Fehlstellengrenzwerten von 30%, 50% und 80% der Wanddicke eine Verfeinerung in

dem relevanten Gitterbereich erreicht werden, wobei diejenigen Zellen sukzessive unterteilt werden, die die vorstehenden Tiefenwerte überschreiten. Die Gitterdeformation korreliert dann mit der angenommenen Fehlstellengeometrie, d.h. in Bereichen großer Gradienten befindet sich eine größere Anzahl an Gitterpunkten.

Nachdem nun ein zentral allen Experten-Routinen zur Verfügung gestelltes Fehlstellengitter selektiert wurde, wird anschließend in Schritt 14 fehlstellenspezifisch in jeweiligen Experten-Routinen eine neue Experten-Fehlstellengeometrie berechnet und unter 14.1 überprüft, ob diese den weiteren Experten-Routinen zur Verfügung gestellt werden muss. Dies ist dann der Fall, wenn wie vorbeschrieben z.B. eine Fitness-Funktion verbessert wurde und noch kein Stopp-Kriterium die Fehlstellen-Findung beendet. In diesem Fall geht es mit der oder den insbesondere dann allen Experten-Routinen zur Verfügung gestellten Fehlstellengeometrien in der Iteration weiter. Anderenfalls wird in 14.2. das Verfahren mit Bestimmung der Fehlstellengeometrien und insbesondere der Angabe der Genauigkeit der Lösung beendet. Ergänzend kann auf Basis der gefundenen Fehlstellengeometrien der burst pressure berechnet werden.

Auf der EDV-Einheit wird gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren der Ablauf des Arbeitsflusses einer Gruppe von Experten-Routinen 11, die miteinander im Wettstreit stehen, simuliert. Hierfür kann das Programm verschiedene Module aufweisen, die unabhängig voneinander und insbesondere nicht miteinander synchronisiert Daten in bestimmte Bereiche der EDV-Einheit einstellen können, damit diese dort weiter

- 34 -

verarbeitet werden. Dies erfolgt insbesondere unter Aufsicht einer Überwachungs-routine 9 (Fig. 5). Eine Mehrzahl von Experten-Routinen 11 hält somit in Abhängig-keit von dem vorstehend definierten Erfolg, d.h. z.B. der Anzahl der in einem ge-meinsamen Speicherbereich 12 hineingeschriebenen Ausgangsfehlstellengeomet-rien eine Anzahl von Rechen-Slots 13, um jeweils Experten-Fehlstellengeometrien zu erzeugen und/oder zugehörige MFL-Simulationen durchführen zu können oder im Falle eines unabhängigen MFL-Simulationsmoduls durchführen zu lassen. Dies ent-spricht dem Block 14 nach Fig. 4, wobei dieser exemplarisch für mehrere Experten-Routinen 11 (Fig. 5) steht. Ausgehend von den einzelnen Rechen-Slots 13 werden gemäß dem vorliegenden Ausführungsbeispiel die Simulationen der zu den einzel-nen Experten-Fehlstellengeometrien passenden Messdaten zwecks Erstellung der Experten-Vorhersagedatensätze ebenfalls unter Aufsicht der Überwachungsroutine 9 in den Simulationsmodulen 16 durchgeführt. Je mehr Slots 13 für eine Experten-Routine zur Verfügung steht, desto größer ist der Anteil an EDV-Ressourcen für diese Experten-Routine. Vorzugsweise ist die Anzahl der zur Durchführung von Si-mulationen vorgesehenen Programmmodule gleich der Anzahl der Slots. Die Über-wachungsroutine 9 überwacht die Anzahl der Iterationen und die sich hieraus erge-benden Änderungen der Ausgangsfehlstellengeometrie und überwacht weiter, ob ein zugehöriges Stopp-Kriterium erreicht ist. Anschließend wird das Ergebnis gemäß Block 17, der dem Block 14.2 aus Fig. 4 entspricht, ausgegeben.

Die Anzahl der für eine Experten-Routine 11 zur Verfügung stehenden Rechen-Slots 13 und die anschließend zur Verfügung gestellten Simulationsroutinen können der-gestalt variieren, dass eine erste Experten-Routine beispielhaft bis zu 50% der für

- 35 -

die Rechen-Slots und Simulationsroutinen zur Verfügung stehenden gesamten Rechenzeit ausnutzen kann.

Im Speicherbereich 12 werden wie dargestellt die Ausgangsfehlstellengeometrien gespeichert. Hierbei kann es sich um einen den Experten-Routinen 11 zugänglichen Speicherbereich handeln. Dort können ebenfalls Log-Dateien der Experten-Routinen 11 und Überwachungs-Routine 9 sowie Anweisungen an die Experten-Routinen 11 hinterlegt werden, die von diesen dann selbständig umgesetzt werden. Beispielsweise kann es sich hierbei um einen Interrupt-Befehl handeln, der bei Erreichen des Stopp-Kriteriums gesetzt wird.

Vorzugsweise sind die Experten-Routinen 11 unabhängige Programmmodule, die neue Experten-Fehlstellengeometrien erzeugen und in die Simulationsroutinen 16 einstellen. Weiterhin kann in den Experten-Routinen 11 die eingangs dargestellte Fitnessfunktion auf Basis des Experten-Vorhersagedatensatzes erzeugt und mit dem im Bereich 12 abgelegten Ausgangsvorhersagedatensatz verglichen werden. Sofern die Experten-Vorhersagedatensätze den Referenzdatensätzen insgesamt ähnlicher ist als die im Bereich 12 abgelegten Datensätze, werden diese Experten-Vorhersagedatensätze dann als neue Ausgangs-Vorhersagedatensätze verwendet.

Beispielsweise wird in den Experten-Routinen 11 eine neue Fehlstellengeometrie zufallsbasiert erzeugt. Hierfür können Maschinenlernalgorithmen oder empirische Regeln verwendet werden. Vorteilhafterweise ist jedoch zur weiterhin verbesserten Konvergenz der Lösungen die Realisierung zumindest zweier nach Art der Fehlstelle

fehlstellenspezifisch arbeitenden Basis-Experten-Routinen wie nachfolgend beschrieben vorgesehen.

Diese vorzugsweise immer bei einem erfindungsgemäßen Verfahren realisierten Suchstrategien basieren zur Bestimmung einer korrosionsbasierten Fehlstellengeometrie auf einer angenommenen Wahrscheinlichkeitsverteilung  $p(x,y)$  von Gitterpunkten, deren Tiefenwert eine maximale Reduktion der Fitnessfunktion ergeben. Die Wahrscheinlichkeitsfunktion wird verwendet um N Gitterpunkte  $(x_n, y_n)$  zu identifizieren. Anstelle von Gitterpunkten  $x_n, y_n$  kann auch die vorstehend bereits verwendete Parameterdarstellung der Gruppe von Fehlstellen  $(x_1 \dots x_n)$  als Gegenstand der Wahrscheinlichkeitsverteilung angenommen werden, wobei sich zum Zwecke der einfacheren Erklärung bei der Wahrscheinlichkeitsverteilung nachfolgend auf N Gitterpunkte  $(x,y)$  bzw.  $(x_n, y_n)$  bezogen wird.

An jedem der betrachteten Punkte wird die Tiefenfunktion, die vorliegend die Tiefe D der Korrosion an der Gitterstelle beschreibt, um  $\Delta D$  geändert, wobei das Vorzeichen der Änderung zufallsgeneriert verteilt wird. D ist ein Satz von Parametern, die Korrosion beschreiben, und ist eine Untermenge eines gemeinsamen Satzes von Parametern, der die Fehlstellengeometrie beschreibt. Auch die Anzahl der ausgewählten Punkte N kann zufallsbasiert gewählt werden:

$$D_{new}(x, y) = \begin{cases} D(x_n, y_n) \mp \Delta D, & \text{für ausgewählte Punkte} \\ D(x, y), & \text{sonst} \end{cases}$$

Mit einer Auswahl der Wahrscheinlichkeitsfunktion  $p(x,y)$  können unterschiedliche Expertenstrategien realisiert werden, beispielhaft:

$$p(x, y) = \frac{D(x,y)}{\|D(x,y)\|}$$

Dieser Algorithmus realisiert eine Variation der Fehlstellentiefen, bei dem die Gitterpunkte mit der größten Tiefe bevorzugt werden. Eine andere Strategie für eine korrosionsbasierte Entwicklung der Experten-Fehlstellengeometrie kann wie folgt aussehen:

$$p(x, y) = \frac{H_{the\ best}(x, y) - H_m(x, y)}{\|H_{the\ best}(x, y) - H_m(x, y)\|}$$

Ein solcher Algorithmus variiert die Fehlstellengeometrie an Positionen, bei denen das simulierte MFL-Messsignal  $H_{the\ best}$  für die beste bekannte Lösung den größten Unterschied zum gemessenen Signal  $H_m$  besitzt.

Basierend hierauf können durch Variationen der Anzahl der zu betrachtenden Gitterpunkte und des  $\Delta D$  unterschiedliche Experten-Routinen bzw. deren Algorithmen aufgebaut werden. Beispielhaft können die nachfolgenden sechs Experten-Routinen für die Entwicklung von auf Korrosion basierten Fehlstellen verwendet werden:

1.  $p(x, y) = \frac{D(x,y)}{\|D(x,y)\|}$ ,  $N = 1$  and  $\Delta D = 1\%$  Wanddicke
2.  $p(x, y) = \frac{D(x,y)}{\|D(x,y)\|}$ ,  $N = 2$  and  $\Delta D = 5\%$  Wanddicke
3.  $p(x, y) = \frac{D(x,y)}{\|D(x,y)\|}$ ,  $N = 3$  and  $\Delta D = 5\%$  Wanddicke
4.  $p(x, y) = \frac{H_{the\ best}(x,y) - H_m(x,y)}{\|H_{the\ best}(x,y) - H_m(x,y)\|}$ ,  $N = 1$  und  $\Delta D = 1\%$  Wanddicke
5.  $p(x, y) = \frac{H_{the\ best}(x,y) - H_m(x,y)}{\|H_{the\ best}(x,y) - H_m(x,y)\|}$ ,  $N = 2$  und  $\Delta D = 5\%$  Wanddicke
6.  $p(x, y) = \frac{H_{the\ best}(x,y) - H_m(x,y)}{\|H_{the\ best}(x,y) - H_m(x,y)\|}$ ,  $N = 3$  und  $\Delta D = 5\%$  Wanddicke

Für eine Experten-Routine, die für die Variation einer rissbasierten Fehlstelle geeignet ist, können folgende Funktionsvorschriften verwendet werden:

- die Tiefe der Fehlstelle wird zufallsbasiert um einen bestimmten Betrag, vorzugsweise z.B. 1 oder 2 % der Wandstärke des Objekts, verringert oder vergrößert,
- die Position aller Punkte des Risses wird in eine zufällig ausgewählte Richtung variiert, und/oder
- eine den Riss beschreibende Linie wird verlängert oder gekürzt durch die Position der Gitterknoten auf dem Objekt- oder Defektgitter.

Eine Experten-Routine, die einen Laminierdefekt beschreibt, kann nach folgenden Funktionsvorschriften arbeiten:

- Auf Basis der 2D-Parameterbeschreibung eines Laminierdefekts werden die den Gitterknoten zugehörigen Werte schrittweise um 5% in die eine oder andere Richtung variiert mit dem Ziel, die Position der Laminierung zu variieren; dies kann auch nur für eine Teilmenge der Bekannten der 2D-Beschreibung der Lamination,
- zufällig ausgewählte Punkte (Gitterknoten) mit Werten ungleich Null, die in der Nachbarschaft von Punkten mit Werten von Null besitzen, können auf Null gesetzt werden (Reduzierung der Ausdehnung der Laminierung),

- 39 -

- zufällig ausgewählte Gitterpunkte mit Werten von Null, die in der Nachbarschaft von Gitterpunkten mit Werten ungleich Null befindlich sind, können auf den entsprechenden Nachbarschaftswert gesetzt werden, wodurch die Laminierung vergrößert wird, und/oder
- alle Werte in dem Gitter können in eine zufällig ausgewählte Richtung bewegt werden, womit eine Änderung der Position der Laminierung entlang der Pipelineoberfläche einhergeht.

Die in Fig. 5 dargestellte Überwachungs-Routine 9 hat wie beschrieben insbesondere zwei Funktionen: Zum einen wird das Erreichen des Stopp-Kriteriums überprüft und zum zweiten werden die Zuweisung der Ressourcen der EDV-Einheit zwischen den einzelnen Experten basierend auf deren Erfolgen vorgenommen. Ein Maß für den Erfolg ist

$$P = \frac{\Delta F}{N},$$

wobei  $\Delta F$  die Reduktion der Fitnessfunktion  $F$  durch das Ergebnis der jeweiligen Experten-Routine und in diesem Fall nun  $N$  die Anzahl der hierfür notwendigen Simulationen ist. Eine Bewertung der  $n$  Experten-Routinen kann als

$$R_n = \frac{P_n}{\sum P_i}.$$

angenommen werden. Die Anzahl der Rechen-Slots  $N_s$  für eine Experten-Routine in einer Iteration ist dann

$$N_s = \text{int}(R_n N_{\text{all}}),$$

wobei  $N_{all}$  die Anzahl aller verfügbaren Slots ist.

In den Simulations-Routinen 16 werden die jeweiligen zerstörungsfreien Messungen für die Experten-Fehlstellengeometrien simuliert. Eine Experten-Routine kann so lange iterieren, bis sie eine Lösung findet, deren Experten-Vorhersagedatensätze besser sind als die im Bereich 12 gespeicherten Ausgangsvorhersagedatensätze. Wenn dies der Fall ist, kann die Experten-Routine 11 ausgehend von der bereits verbesserten Lösung versuchen, weitere bessere Lösungen zu erreichen.

Ein sich ergebender Fehler  $E$  für die einzelnen Betrachtungen der simulierten und gemessenen Datensätze kann sich aus den Fehlern der jeweiligen Datensätzen in den einzelnen Kalkulationen ergeben:

$$E = \sum_i \|Y_{cal}^i(D) - Y_m^i\| ,$$

wobei  $Y_m$  und  $Y_{cal}$  die vorbeschriebenen, jeweiligen gemessenen und simulierten Messfelder an den Fehlstellengeometrien ( $x_1 \dots x_n$ ) darstellen.

Um die Effizienz des vorgeschlagenen Verfahrens zu demonstrieren, wurde eine Vielzahl von Testszenarien durchgeführt, wobei nachfolgend gemäß den Fig. 6A und 6B die Daten zweier MFL-Inspektionsläufe, die mit voneinander linear unabhängigen Magnetisierungen durchgeführt wurden, verwendet werden. Fig. 6A zeigt bei einer Signalstärke zwischen 22,2 und 30,6 kA/m Daten einer realen MFL-Messung mit in axialer Richtung verlaufender Magnetisierung, während die nach Fig. 6B aus einer in Umfangsrichtung erfolgten Messung (Signalstärke 22,2 bis 91,1 kA/m) resultieren.

Die Konturlinien sind bei beiden Abbildungen gleichmäßig über den angegebenen Bereich verteilt. Zusätzlich werden zwei durch ein EMAT-Verfahren gewonnene Datensätze als Referenzdatensätze herangezogen, wobei der in Fig. 6C dargestellte Datensatz das Empfangssignal eines Reflektionen aufgrund von Fehlstellen detektierenden Empfangswandlers und der in Fig. 6D dargestellte Referenzdatensatz das zugehörige Transmissionssignal eines Referenzwandlers zeigt. Dargestellt sind jeweils normierte Signale in Form von Counts. Beide EMAT-Datensätze werden nach ihrer Aufbereitung, die vorliegend eine Reihe von Fouriertransformationen umfassen, mittels einer jeweiligen Eingangsschicht als Eingangsdaten für ein neuronales Netz zur Verfügung gestellt. Ebenfalls werden die beiden MFL-Datensätze über jeweilige Eingangsschichten dem neuronale Netz zur Verfügung gestellt.

Über das neuronale Netz wurde auf der EDV-Einheit eine anfängliche Fehlstellengeometrie bestimmt, die anschließend iterativ bis zum Erreichen eines Stopp-Kriteriums verbessert wurde. Das Ergebnis des erfindungsgemäßen Verfahrens ist in Fig. 6E dargestellt, welche die Tiefe etwaiger Fehlstellen an der Innenseite des betrachteten Pipeline-Abschnitts zeigt. Aufgrund des erfindungsgemäßen Verfahrens ergibt sich eine große Übereinstimmung mit der durch einen Laserscan ermittelten realen Geometrie (Fig. 6F). Sowohl in Fig. 6E als auch Fig. 6F ist mittels der Konturlinien ein Bereich von 0 bis 60 % Metallverlust der Rohrwand gekennzeichnet. Die Kombination der MFL- und der EMAT-Messdaten im erfindungsgemäßen Verfahren führt vorliegend schneller zu einem Ergebnis als wenn beispielsweise nur MFL-Daten verwendet worden wären. Die Zeitersparnis liegt bei rund 20%. Gleichzeitig zeigt die

- 42 -

kombinierte Betrachtung der beiden unterschiedlichen Messverfahren, dass die vorliegend detektierten Fehlstellen rein korrosionsbasiert sind.

Auf Basis der herkömmlichen Betrachtung mit im Stand der Technik etablierter Ermittlung der Fehlstellengeometrie ergibt sich der erwähnte burst pressure von 4744,69 kPa. Auf Basis des erfindungsgemäßen Verfahrens ergibt sich für den MFL-Datensatz die in der Fig. 6F gezeigte Fehlstellengeometrie (Konturlinien bei 2 mm Tiefe) und basierend hierauf ein burst pressure von 8543,46 kPa. Dieser reicht vorliegend bis auf 99,4 % an den burst pressure heran, der aufgrund der per Laserscan ermittelten tatsächlichen Fehlstellengeometrie bestimmt wurde. Demnach kann eine nach dem erfindungsgemäßen Verfahren untersuchte Pipeline mit einem sicheren Betriebsdruck von 6520,53 kPa betrieben werden. Hiermit ergeben sich im Vergleich zu dem sicheren Betriebsdruck von 3621,29 kPa aufgrund der Auswertung nach dem Stand der Technik erhebliche Vorteile für Pipeline-Betreiber. Durch die zusätzliche Verwendung des EMAT-Referenzdatensatzes hat sich vorliegend das Ergebnis im Vergleich zur Betrachtung nur der MFL-Datensätze weder verschlechtert noch verbessert, da gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren im betrachteten Rohrabchnitt keine Risse und keine Laminierung bzw. Laminierdefekte vorhanden waren, die die Betrachtung des burst pressures negativ beeinflusst hätten.

Fig. 7 zeigt nochmal den Ablauf einer möglichen Implementierung des erfindungsgemäßen Verfahrens. Auf Grundlage von Messdaten 20 aus einer oder mehreren Kalibrierungsmessungen mit einem zerstörungsfreien Messverfahren an einem Kalib-

rierungsobjekt bekannter Geometrie, insbesondere mit Fehlstellen bekannter Geometrie, wird ein Modell für den zerstörungsfrei arbeitenden Sensor 21 erstellt. Mit einer Abschätzung der relevanten Materialeigenschaften des untersuchten Objekts wird in Schritt 22 eine Simulationsroutine eingerichtet. Dies kann durch Vorgabe bekannter Parameter geschehen, die die Materialeigenschaften sowie Eigenschaften des verwendeten Sensors repräsentieren. Alternativ oder zusätzlich kann eine iterative Anpassung der Parameter erfolgen, bis die Ergebnisse der Simulationsroutine für das verwendete zerstörungsfreie Messverfahren auf Basis der bekannten Geometrie des Kalibrierungsobjekts ausreichend genau mit den Messdaten der Kalibrierungsmessung übereinstimmen. Die Simulationsroutine kann auch vorbereitet sein und für mehrere Messungen mittels des zerstörungsfreien Messverfahrens wiederverwendet werden.

Auf Basis einer oder mehrerer Messungen mit einem oder mehreren zerstörungsfreien Messverfahren werden ein oder mehrere Referenzdatensätze erstellt. Fig. 7 zeigt in Schritt 2 die Erstellung eines Referenzdatensatzes auf Basis mehrerer Messläufe. Auf Basis des Referenzdatensatzes wird in Schritt 23 eine Klassifizierung durchgeführt in anomalfreie Bereiche und anomaliebehaftete Bereiche. Zur Unterscheidung anomalfreier Bereiche von anomaliebehafteten Bereichen können unterschiedliche Kriterien verwendet werden. Durch die Verwendungen von zwei oder mehr Referenzdatensätzen, die auf Basis unterschiedlicher zerstörungsfreier Messverfahren erhalten wurden, kann die Klassifizierung noch einmal verbessert werden, dergestalt, dass einzelne Messverfahren für bestimmte Fehlstellen sensibler sind als für andere.

Auf Grundlage der anomaliefreien Bereiche und unter Verwendung der Simulationsroutine wird in Schritt 24 ein das die intakte Geometrie des Objekts repräsentierendes Objektgitter erstellt. Hierzu können auch Informationen von vorherigen Messläufen in dem dann noch ohne bzw. mit weniger Fehlstellen behaftete Objekt verwendet werden. Hierzu kann das Objektgitter in den anomaliefreien Bereichen erstellt und anschließend durch extrapolieren und/oder interpolieren in die anomaliebehafteten Bereiche vervollständigt werden. Es ist auch denkbar, eine Interpolation und/oder Extrapolation auf Basis der Referenzdatensätze aus den anomaliefreien Bereichen in die anomaliebehafteten Bereiche vorzunehmen.

Die Erstellung des Objektgitters erfolgt durch einen iterativen Prozess. Es wird ein erstes Ausgangsobjektgitter geraten oder beispielsweise auf Basis einer geschätzten Objektgeometrie vorgegeben. Diese wird in einem iterativen Verfahren angepasst. Ein Ausgangsobjektgitter kann beispielsweise eine Schweißnaht gemäß der in Fig. 8 im Querschnitt dargestellten aufweisen. Das Ausgangsgitter kann solange iterativ angepasst werden, bis es eine die Schweißnaht repräsentierende Form aufweist.

Um das Verfahren zu beschleunigen, kann insbesondere auch eine parametrische Beschreibung der Schweißnaht durch ein parametrisches Geometriemodell verwendet werden. Fig. 8 zeigt ein solches parametrisches Geometriemodell. In diesem Modell wird die Form der Schweißnaht durch eine geringe Anzahl an Parametern,

vorliegend sieben beschrieben. Die Parameter beschreiben die Wandstärke des Objekts ( $z_5$ ), die jeweilige Ausdehnung der Schweißnaht auf beiden Seiten ( $z_3, z_6$ ), die Schweißnahtüberhöhung ( $z_1, z_7$ ), sowie Breite und Tiefe von Kerben an der Schweißnaht ( $z_2, z_4$ ). Das Objektgitter kann somit im Bereich der Schweißnaht durch Anpassung einer geringen Anzahl von Parametern verändert werden. Hierbei nutzt man vorbekannte Informationen über eine generelle Form eines Objektbereichs, hier einer Schweißnaht, aus. Zusätzlich können für einzelne Parameter Randbedingungen vorgegeben werden. Hierdurch werden physikalisch unsinnige oder unmögliche Ergebnisse ausgeschlossen. In Fig. 8 können die Parameter  $z_2, z_3, z_5$  und  $z_6$  zum Beispiel nicht sinnvoll negativ sein,  $z_4$  kann sinnvoll nicht größer als  $z_5$  sein usw. Die Parameterwerte können durch das folgende Optimierungsproblem bestimmt werden:

$$\{z_1 \dots z_n\} = \arg \min \sum_i |Y_{cal}^i(z_1 \dots z_n) - Y_m^i|$$

unter Randbedingungen für  $\{z_1 \dots z_n\}$

mit  $Y_m^i$ - gemessenes Signal der  $i$ -ten Messung,  $Y_{cal}^i$  berechnetes Signal für die  $i$ -Messung. Werte für die Parameter können über ableitungsfreie Optimierungsalgorithmen, beispielsweise mittels random search, bestimmt werden. Um das Verfahren zu beschleunigen, kann eine Veränderbarkeit der Parameter in festen Schritten, vorzugsweise definiert als Funktion der Wandstärke, festgelegt werden. Beispielsweise kann eine Veränderung in Schritten erfolgen, die 1% der Wandstärke betragen.

Aufgrund des erfindungsgemäßen Verfahrens lassen sich der Zustand eines Rohres und damit der für einen sicheren Betrieb der Pipeline angebbare Druck deutlich realistischer angeben, während die Betriebssicherheit nach wie vor gewährleistet ist.

- 46 -

Durch das erfindungsgemäße Verfahren mit den um Ressourcen der EDV-Einheit konkurrierenden Experten-Routinen kann ein solches Ergebnis schneller oder zumindest in gleicher Auswertezeit wie im Stand der Technik den Betreibern von Pipelines zur Verfügung gestellt werden.

- 47 -

## Ansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung der Geometrie einer oder mehrerer realer, untersuchter Fehlstellen eines metallischen, insbesondere magnetisierbaren Objekts, insbesondere eines Rohres oder eines Tanks, mittels zumindest zweier auf Basis unterschiedlicher, zerstörungsfreier Messverfahren erzeugter Referenzdatensätze des Objekts,

wobei das Objekt zumindest teilweise auf einem oder durch ein zumindest zweidimensionales, vorzugsweise dreidimensionales, Objektgitter, in einer EDV-Einheit dargestellt wird,

wobei eine Ausgangsfehlstellengeometrie, insbesondere auf dem Objektgitter oder einem zumindest zweidimensionalen Defektgitter, durch Inversion von zumindest Teilen der Referenzdatensätze, insbesondere durch zumindest ein für diese Aufgabe trainiertes neuronales Netz (NN), erzeugt wird, auf Basis der Ausgangsfehlstellengeometrie durch eine Simulationsroutine jeweils ein Vorhersagedatensatz für die bei der Erstellung der Referenzdatensätze verwendeten zerstörungsfreien Messverfahren errechnet wird, ein Vergleich von zumindest Teilen der Vorhersagedatensätze mit zumindest Teilen der Referenzdatensätze erfolgt und in Abhängigkeit von zumindest einem Genauigkeitsmaß das Verfahren zur Bestimmung der Geometrie der Fehlstelle beendet wird oder eine iterative Anpassung der Ausgangsfehlstellengeometrie an die Geometrie der realen Fehlstelle(n) erfolgt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass eine Trainingssimulationsroutine durch Simulation auf Basis verschiedener Trainingsgeometrien Trainingsdaten generiert, mit denen ein neuronales Netz (NN) zur Inversion der Messdaten trainiert wird.
3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass das neuronale Netz (NN) auf Basis von Daten aus einer Datenbank, die simulierte Messungen enthält, trainiert wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass durch einen feature extractor (FE), der vorzugsweise als weiteres neuronales Netz ausgebildet ist, aus einem Referenzdatensatz Eingangsdaten für das neuronale Netz (NN) extrahiert werden.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass mittels des neuronalen Netzes (NN) Eingangsdaten mit einer zweidimensionalen Ortsauflösung in eine Ausgangsfehlstellengeometrie mit dreidimensionaler Ortsauflösung überführt werden.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass durch das neuronale Netz (NN) eine Klassifikation von Fehlstellen erfolgt.
7. Verfahren nach Anspruch einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass als erster Referenzdatensatz ein Datensatz auf Basis eines MFL-,

Wirbelstrom-, EMAT- oder Ultraschall-Messverfahrens und zumindest ein weiterer Referenzdatensatz ein auf Basis eines weiteren aus dieser Gruppe von Messverfahren stammenden Messverfahrens erzeugter Datensatz verwendet wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die iterative Anpassung der Ausgangsfehlstellengeometrie an die Geometrie der realen Fehlstelle(n) mittels der EDV-Einheit und mittels zumindest einer, vorzugsweise mehrerer, insbesondere im Wettbewerb und weiter insbesondere parallel zueinander laufender Experten-Routinen (11) erfolgt,

- wobei in der bzw. den jeweiligen Experten-Routinen (11) mittels wenigstens eines eigenen Algorithmus und auf Basis der Ausgangsfehlstellengeometrie eine jeweilige Experten-Fehlstellengeometrie erzeugt wird,
- auf Basis der jeweiligen Experten-Fehlstellengeometrie jeweilige Experten-Vorhersagedatensätze durch Simulation oder Zuweisung einer zum jeweiligen Referenzdatensatz passenden Messung bestimmt werden,
- und die den jeweiligen Experten-Vorhersagedatensätzen zugrunde liegende Experten-Fehlstellengeometrie dann wenigstens einer, insbesondere allen der Experten-Routinen (11) als neue Ausgangsfehlstellengeometrie zur weiteren Anpassung an die Geometrie der realen Fehlstelle(n) zur Verfügung gestellt wird,

wenn die Experten-Vorhersagedatensätze einer jeweiligen Experten-Routine den jeweiligen Referenzdatensätzen ähnlicher sind als die Ausgangsvorhersagedatensätze und/oder eine die zumindest zwei Experten-Vorhersagedatensätze berücksichtigende Fitnessfunktion verbessert ist,

- 50 -

- und anschließend die zur neuen Ausgangsfehlstellengeometrie gehörenden Experten-Vorhersagedatensätze als neue Ausgangsvorhersagedatensätze verwendet werden,
- wobei die iterative Anpassung mittels der Experten-Routinen (11) solange erfolgt, bis ein Stopp-Kriterium erfüllt ist.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Experten-Routinen (11) dergestalt im Wettbewerb zueinander laufen, dass eine Verteilung der Ressourcen der EDV-Einheit an eine jeweilige Experten-Routine insbesondere in Form von Rechenzeit, vorzugsweise CPU- und/oder GPU-Zeit, in Abhängigkeit einer Erfolgsquote, bei der insbesondere die Anzahl der von dieser Experten-Routine berechneten und für eine oder mehrere andere Experten-Routinen (11) zur Verfügung gestellten Ausgangsfehlstellengeometrien berücksichtigt wird, und/oder in Abhängigkeit einer Reduktion der Fitnessfunktion, bei der insbesondere die Anzahl der für die Reduktion erzeugten Experten-Vorhersagedatensätze berücksichtigt wird, erfolgt.

10. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zur Bestimmung des Objektgitters zunächst auf Basis von zumindest Teilen der Referenzdatensätze eine Klassifizierung von anomaliefreien Bereichen und anomaliebehafteten Bereichen des Objekts erfolgt, wobei insbesondere auf Basis von vorbekannten Informationen über das Objekt ein Ausgangsobjektgitter erstellt wird, unter Verwendung des Ausgangsobjektgitters Vorhersagedatensätze für die jeweiligen zerstörungsfreien Messverfahren errechnet werden, ein Vergleich von zumindest

Teilen der Vorhersagedatensätze mit jeweiligen Teilen der Referenzdatensätze unter Ausschluss der anomaliebehafteten Bereiche erfolgt und in Abhängigkeit von zumindest einem Genauigkeitsmaß das Ausgangsobjektgitter als die Geometrie des Objekts beschreibendes Objektgitter verwendet wird oder mittels der EDV-Einheit eine iterative Anpassung des Ausgangsobjektgitters an die Geometrie des Objekts in den anomalfreien Bereichen erfolgt.

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass in der iterativen Anpassung des Ausgangsobjektgitters ein neues Ausgangsobjektgitter erstellt und für dieses neue Vorhersagedatensätze errechnet werden, sowie ein Vergleich von zumindest Teilen der neuen Vorhersagedatensätze mit entsprechenden Teilen der Referenzdatensätze unter Ausschluss der anomaliebehafteten Bereiche erfolgt bis ein Objektstopp-Kriterium erfüllt ist, wobei das dann vorliegende Ausgangsobjektgitter als die Geometrie des Objekts beschreibendes Objektgitter verwendet wird.

12. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Klassifizierung eine Zuordnung eines anomalfreien Bereichs zu wenigstens einem vordefinierten lokalen Element des Objektes erfolgt und dieses bei der Erstellung des Ausgangsobjektgitters verwendet oder in das Ausgangsobjektgitter eingefügt wird.

13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass das lokale Element, welches insbesondere in Form einer Schweißnaht ausgebildet ist, mittels eines parametrischen Geometriemodells beschrieben wird.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass als Stopp-Kriterium ein Vergleich der Variation des Experten-Vorhersagedatensatzes mit der Messstreuung des realen Datensatzes verwendet wird.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass in der oder den Experten-Routinen (11) zur Erzeugung der Experten-Fehlstellengeometrie unterschiedliche und fehlstellenspezifische Variationen vorgenommen werden, wobei insbesondere eine erste Experten-Routine (11) zur Variation von Rissen, eine weitere zur Variation von Korrosion und/oder eine weitere zur Variation von Laminierdefekten vorgesehen ist.

16. Verfahren zur Bestimmung einer Belastbarkeitsgrenze eines zumindest im Betrieb druckbelasteten und insbesondere als Öl-, Gas- oder Wasserpipeline ausgebildeten Objekts, bei dem ein eine oder mehrere Fehlstelle(n) beschreibender Datensatz als Eingangsdatensatz in einer Berechnung der Belastbarkeitsgrenze verwendet wird, dadurch gekennzeichnet, dass der Eingangsdatensatz zunächst gemäß einem Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche bestimmt wird.

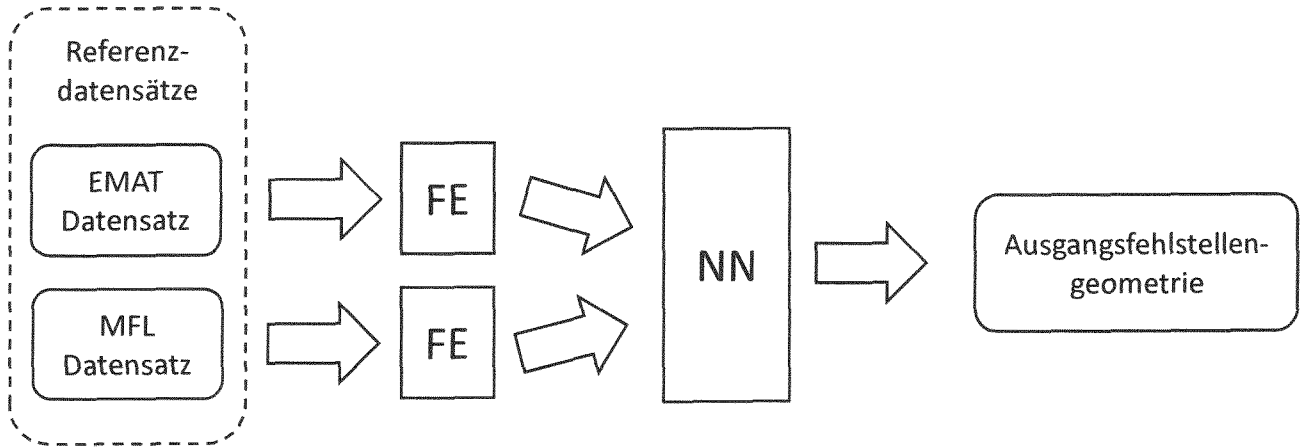


Fig. 1

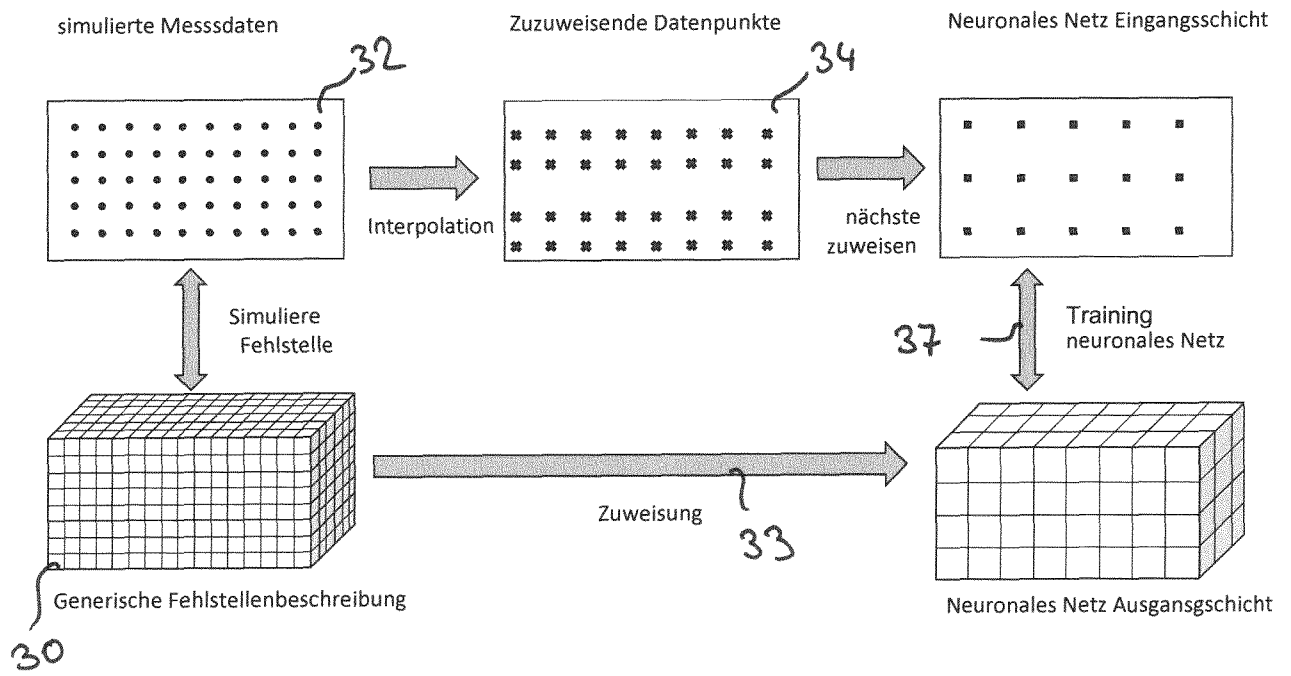


Fig. 2

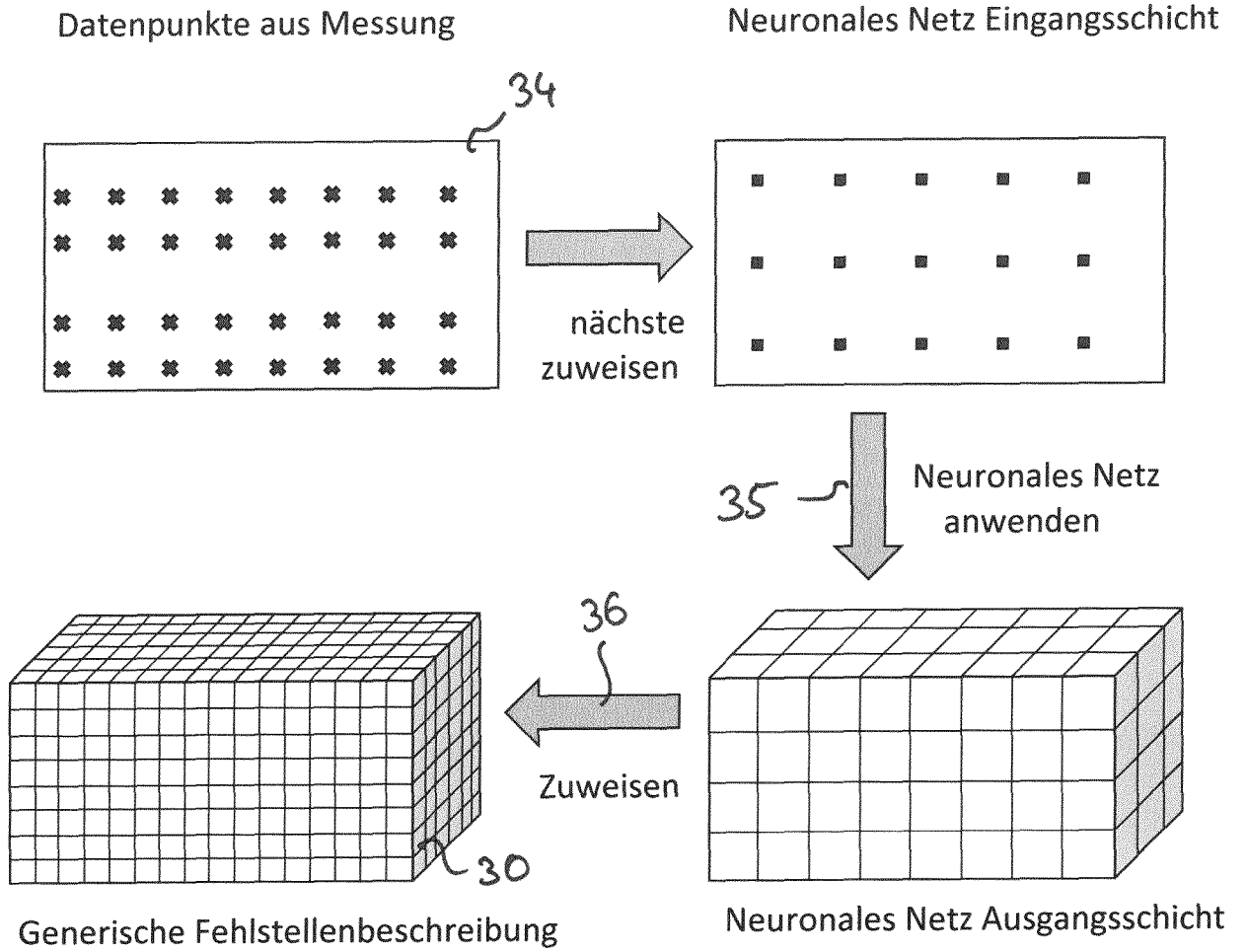


Fig. 3

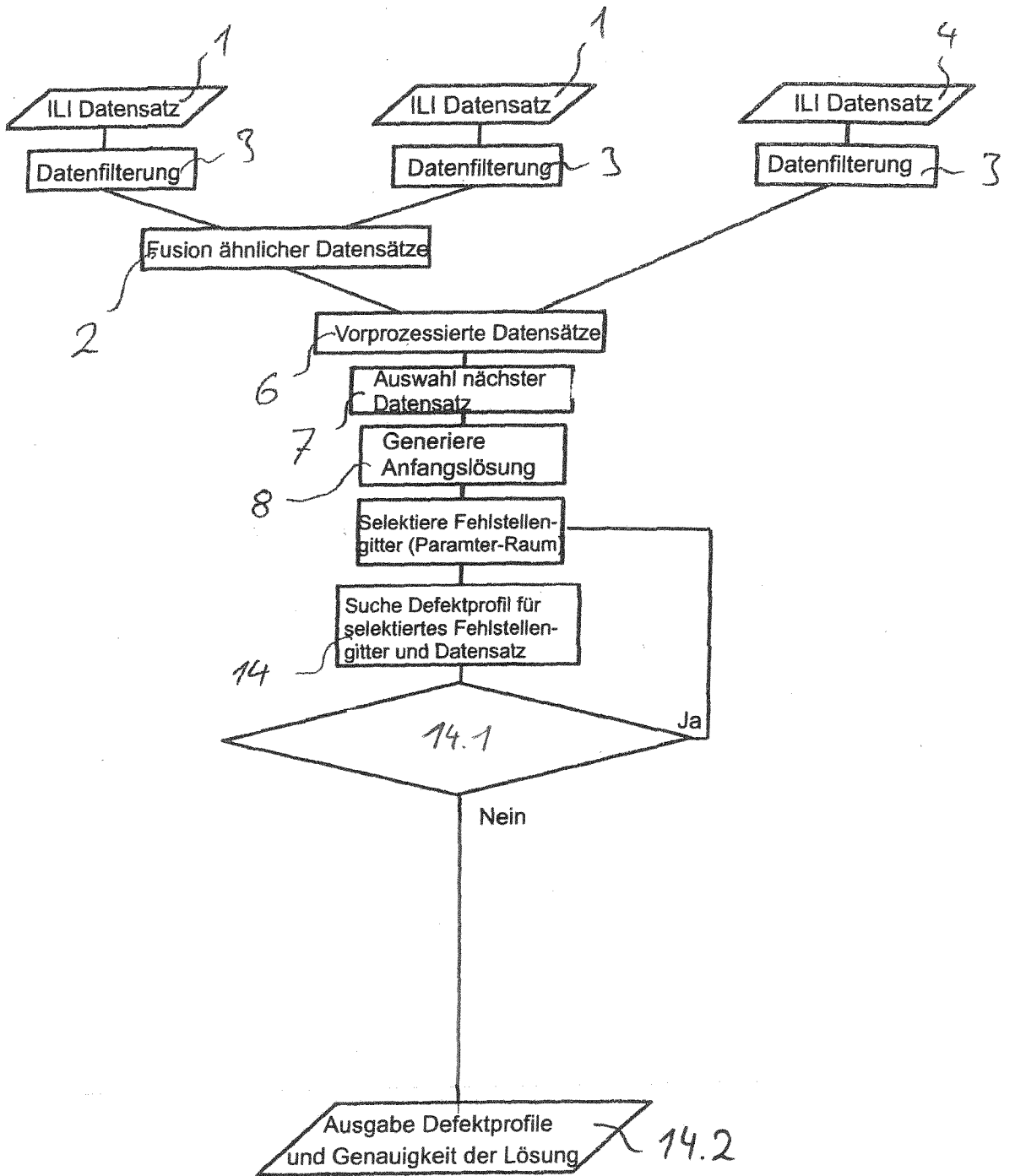


Fig. 4

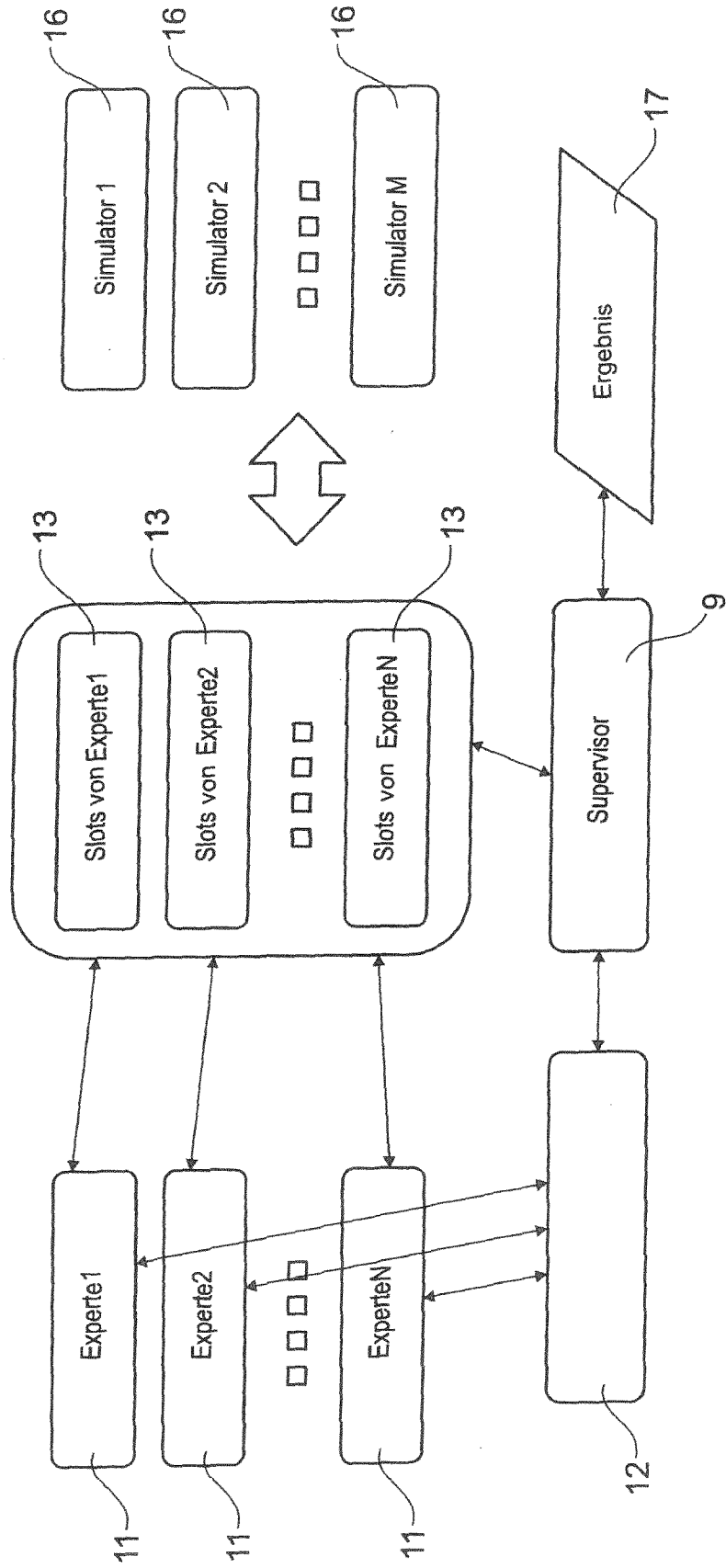


Fig. 5

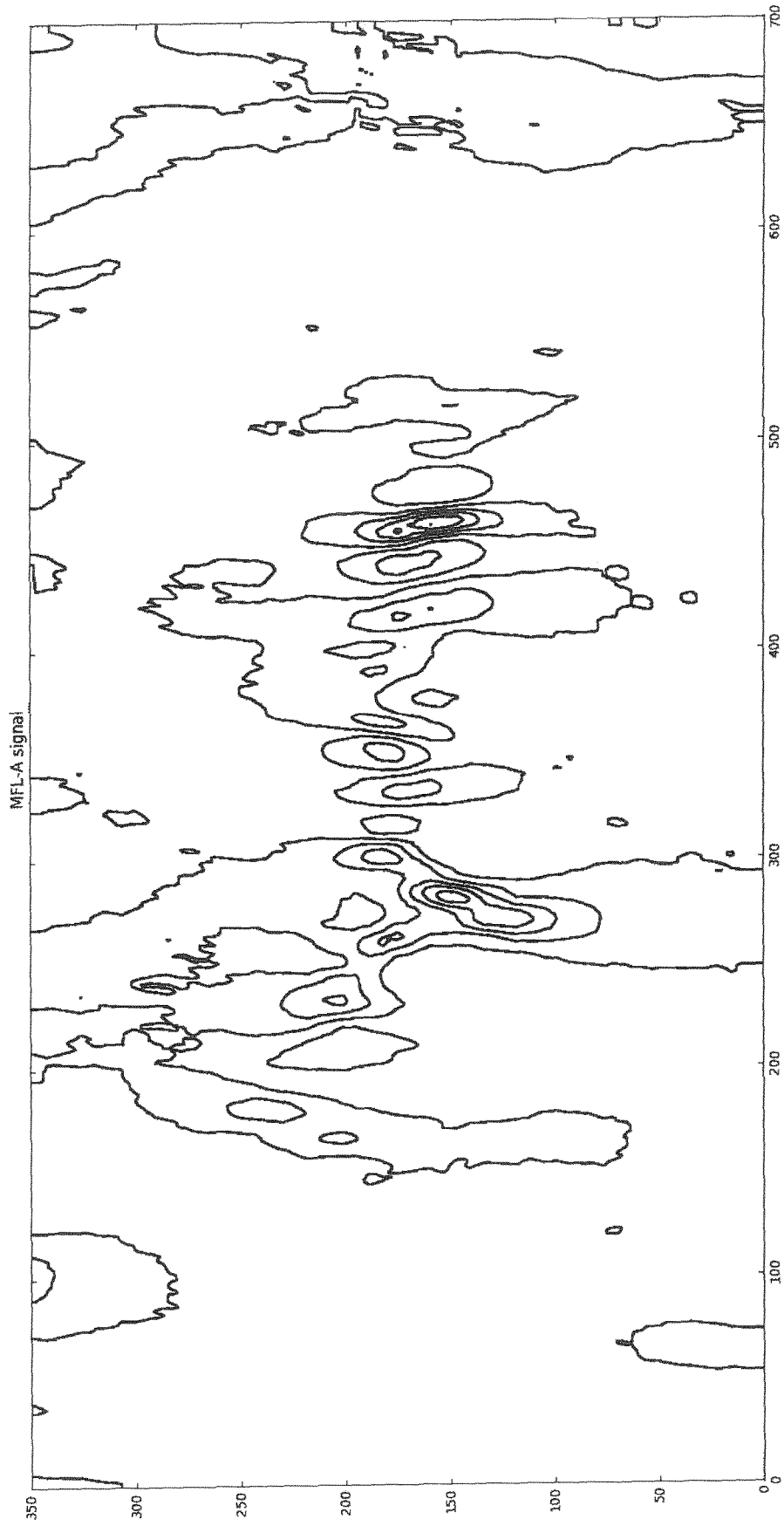


Fig. 6A

21

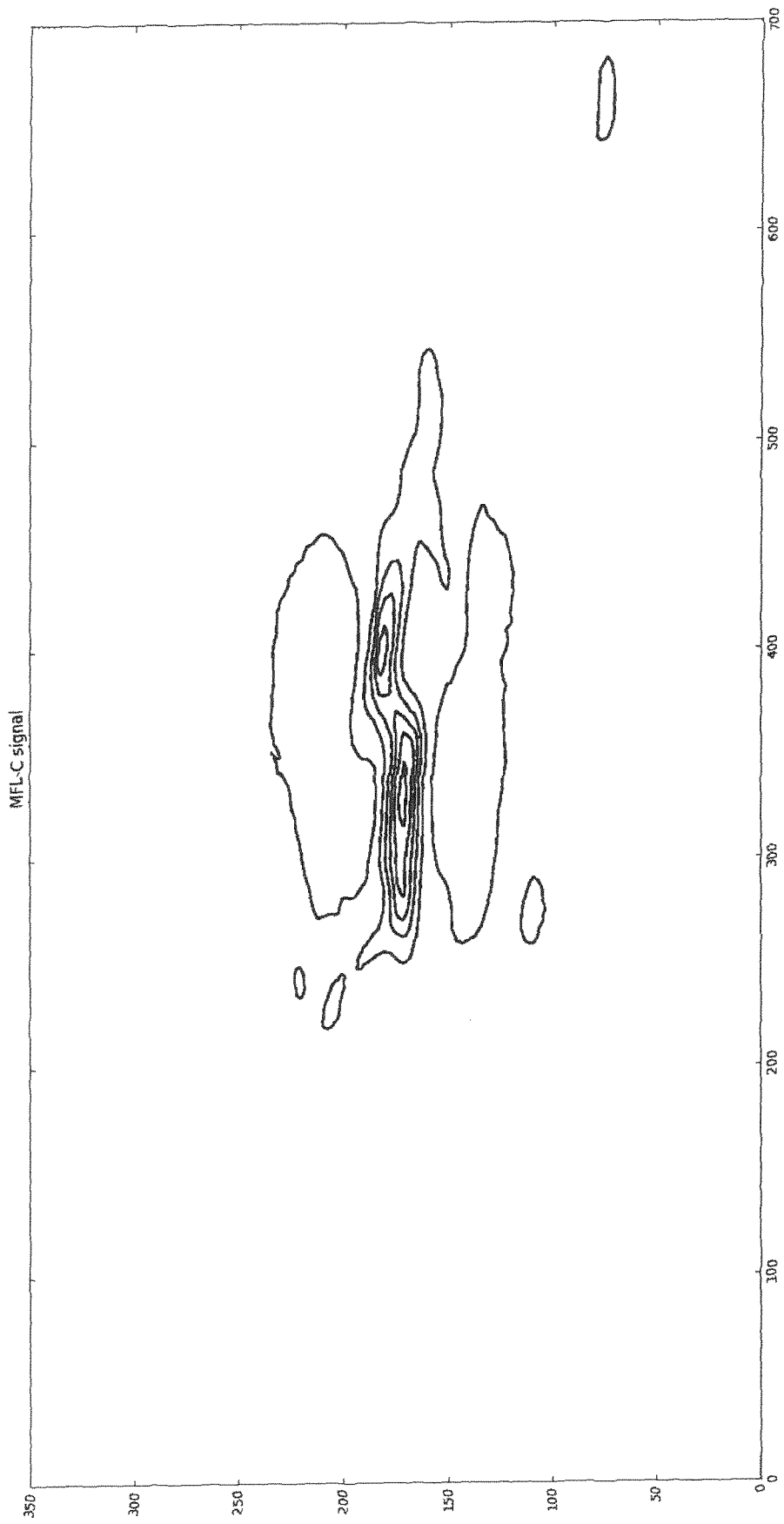


Fig. 6B



Fig. 6C

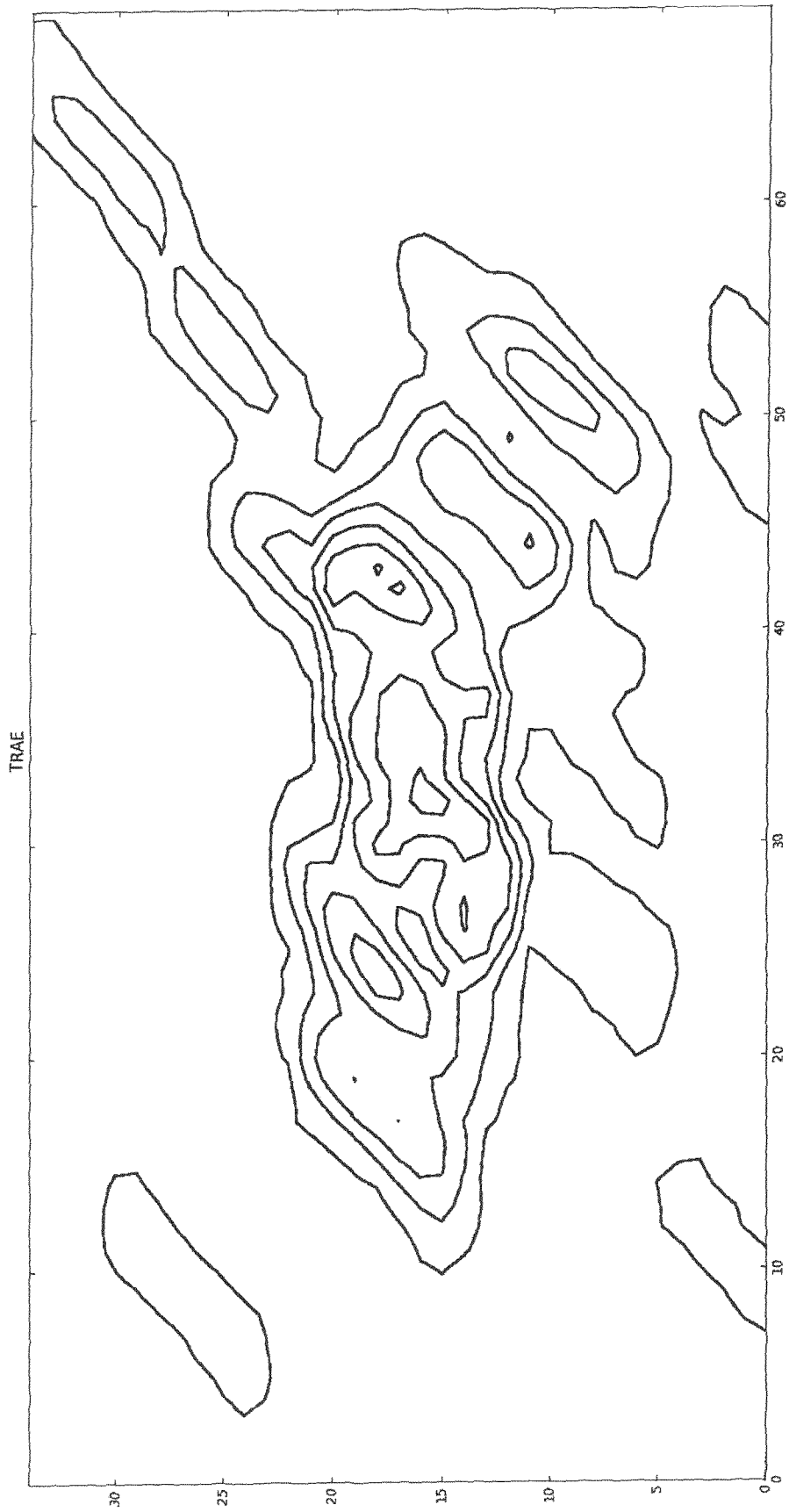


Fig. 6D

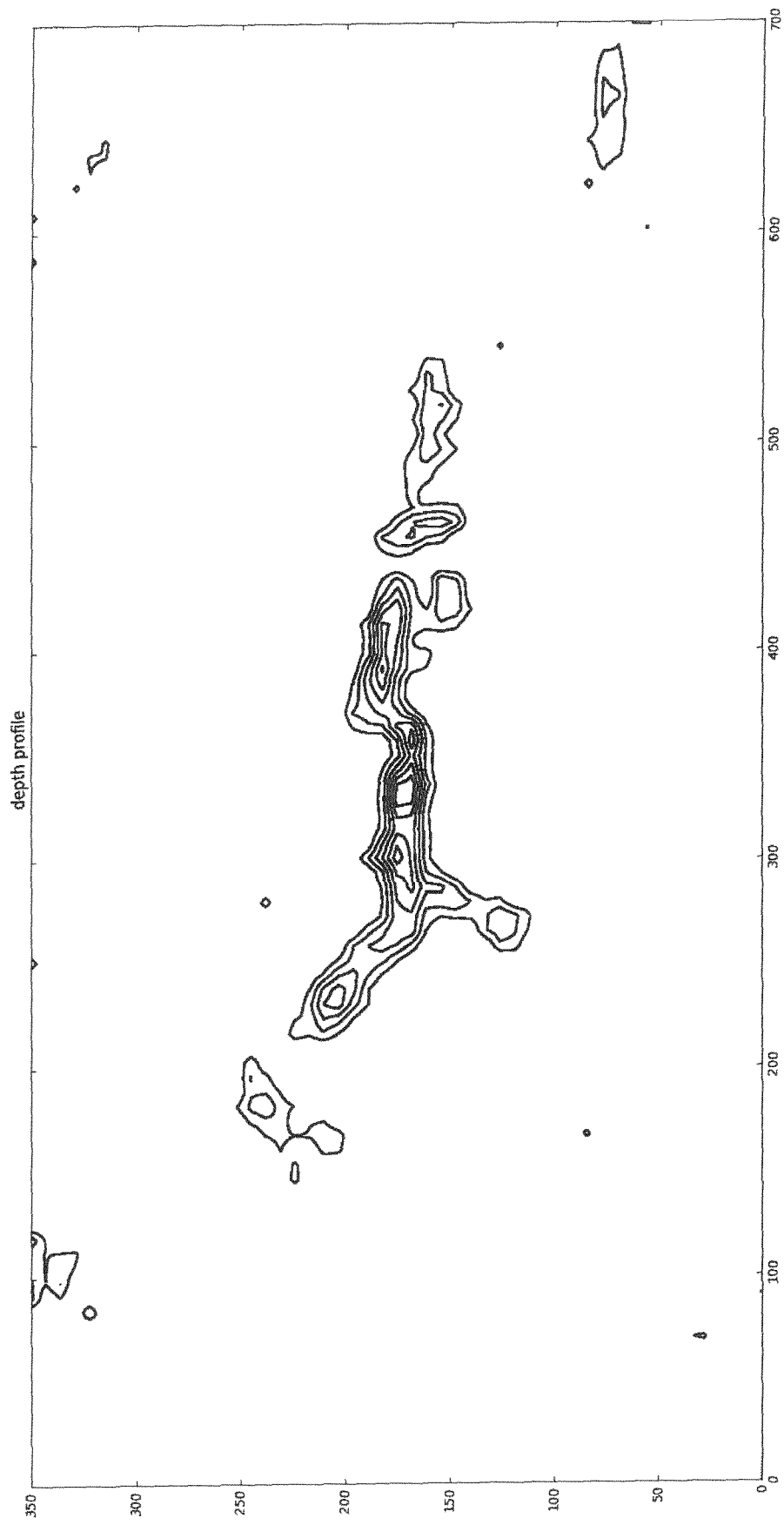


Fig. 6E

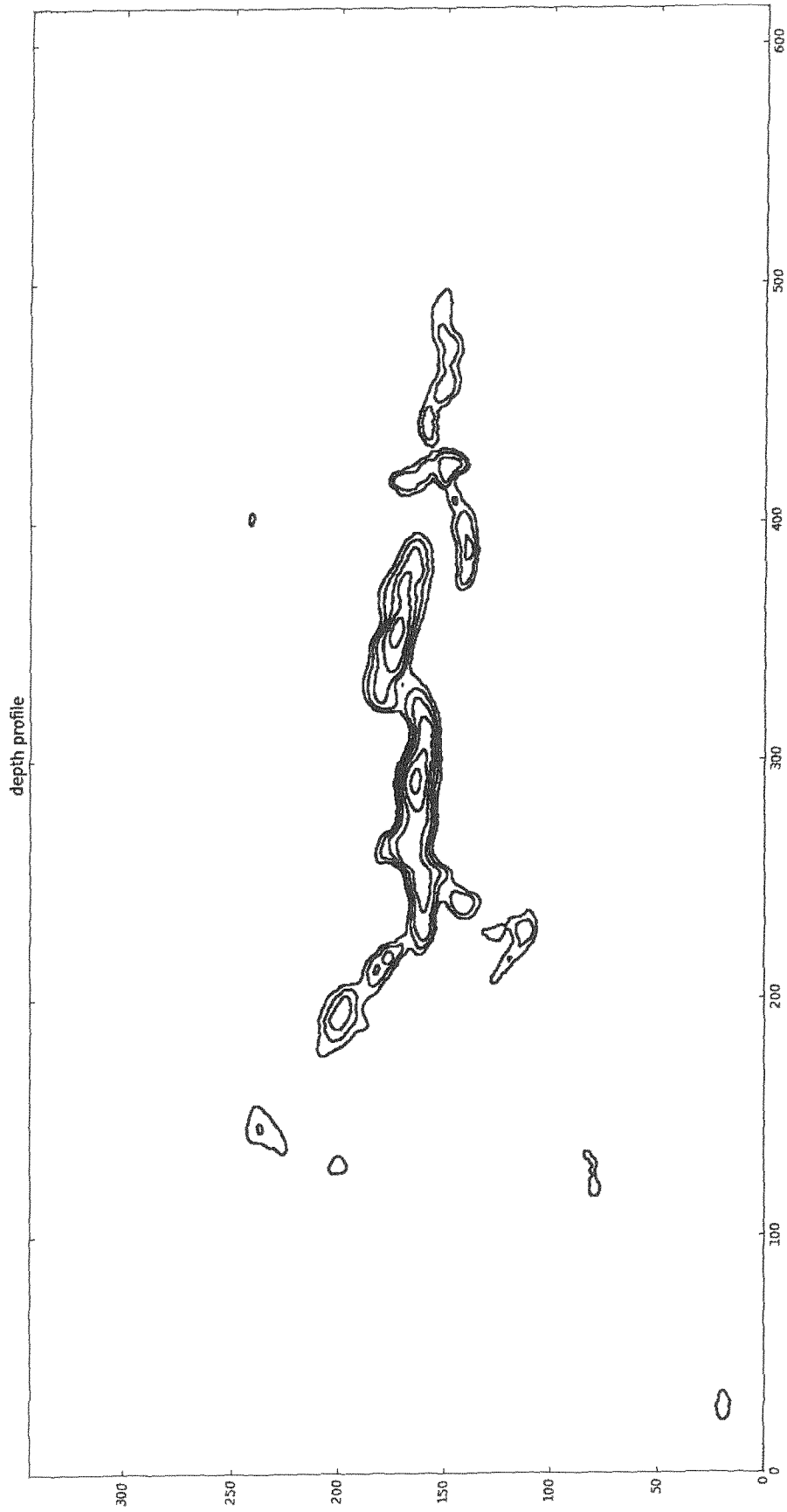


Fig. 6F

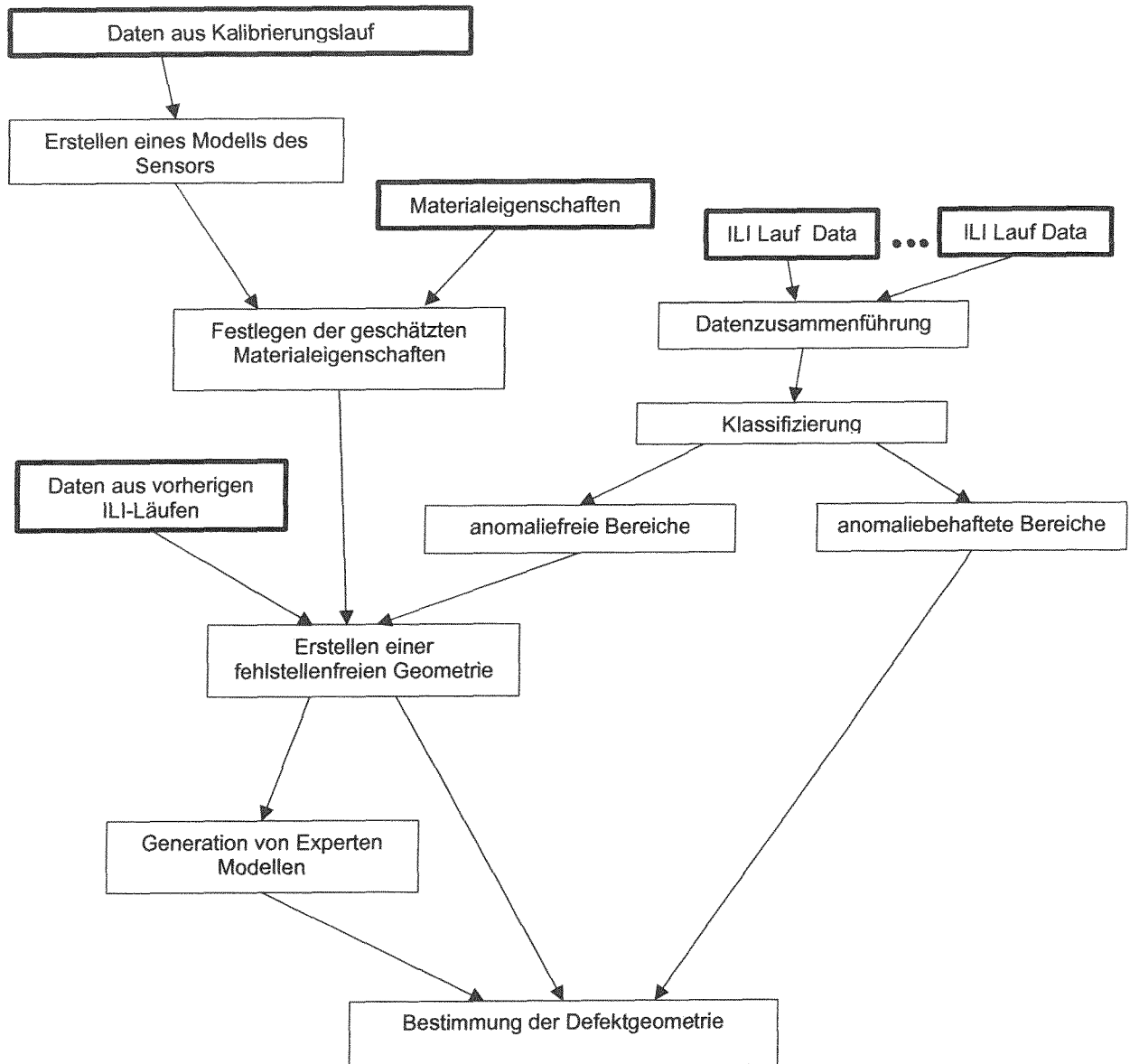


Fig. 7

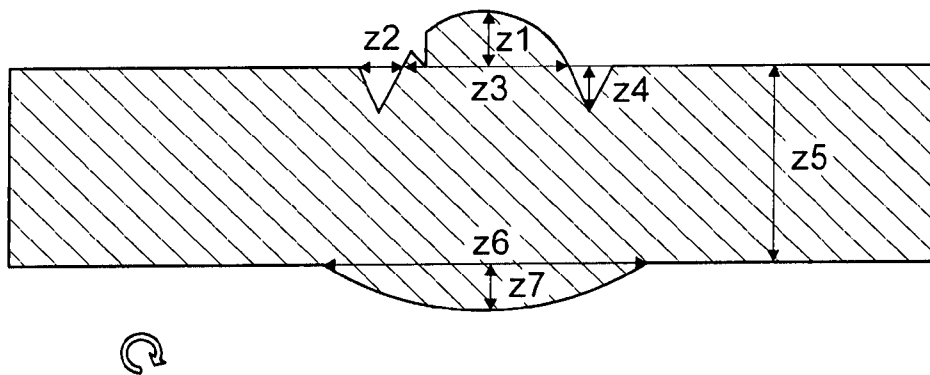


Fig. 8

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

**PCT/EP2020/060189**

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b>		
<i>G01N 27/90</i> (2006.01)i; <i>G01N 29/24</i> (2006.01)i; <i>G01N 29/44</i> (2006.01)i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b>		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G01N		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	WO 2016007267 A1 (HALLIBURTON ENERGY SERVICES INC [US]) 14 January 2016 (2016-01-14)	1-9,14-16
A	abstract paragraph [0002] paragraph [0027] paragraph [0074] - paragraph [0076]	10-13
Y	US 2016245779 A1 (KHALAJ AMINEH REZA [US] ET AL) 25 August 2016 (2016-08-25)	1-9,14-16
A	abstract paragraph [0039]	10-13
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> <p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&amp;” document member of the same patent family</p>		
Date of the actual completion of the international search <b>25 June 2020</b>		Date of mailing of the international search report <b>03 July 2020</b>
Name and mailing address of the ISA/EP <b>European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands</b> Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer <b>Rouault, Patrick</b>  Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No. <b>PCT/EP2020/060189</b>
---

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
WO	2016007267	A1	14 January 2016	EP	3126628	A1	08 February 2017
				US	2016187523	A1	30 June 2016
				WO	2016007267	A1	14 January 2016
US	2016245779	A1	25 August 2016	BR	112016029087	A2	22 August 2017
				EP	3143248	A1	22 March 2017
				US	2016245779	A1	25 August 2016
				WO	2016007883	A1	14 January 2016

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2020/060189

<b>A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES</b> INV. G01N27/90      G01N29/24      G01N29/44 ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
<b>B. RECHERCHIERTE GEBIETE</b>		
Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole ) G01N		
Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal		
<b>C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN</b>		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	WO 2016/007267 A1 (HALLIBURTON ENERGY SERVICES INC [US]) 14. Januar 2016 (2016-01-14)	1-9, 14-16
A	Zusammenfassung Absatz [0002] Absatz [0027] Absatz [0074] - Absatz [0076] -----	10-13
Y	US 2016/245779 A1 (KHALAJ AMINEH REZA [US] ET AL) 25. August 2016 (2016-08-25)	1-9, 14-16
A	Zusammenfassung Absatz [0039] -----	10-13
<input type="checkbox"/> Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen <input checked="" type="checkbox"/> Siehe Anhang Patentfamilie		
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
25. Juni 2020		03/07/2020
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter  Rouault, Patrick

**INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT**

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2020/060189

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2016007267 A1	14-01-2016	EP 3126628 A1	08-02-2017
		US 2016187523 A1	30-06-2016
		WO 2016007267 A1	14-01-2016
-----			
US 2016245779 A1	25-08-2016	BR 112016029087 A2	22-08-2017
		EP 3143248 A1	22-03-2017
		US 2016245779 A1	25-08-2016
		WO 2016007883 A1	14-01-2016
-----			