

(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
20. Dezember 2012 (20.12.2012)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2012/172073 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

H01L 21/66 (2006.01) **G06T 7/00** (2006.01)
G01N 21/95 (2006.01)

Stefan [DE/DE]; Rainer-Maria-Rilke-Straße 5, 79211
Denzlingen (DE). **KRISCH, Jonas** [DE/DE]; Haslacher
Straße 61, 79115 Freiburg (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2012/061496

(74) **Anwälte:** **DICKER, Jochen** et al.; c/o Lemcke, Brommer
& Partner, Bismarckstraße 16, 76133 Karlsruhe (DE).

(22) Internationales Anmeldedatum:
15. Juni 2012 (15.06.2012)

(81) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP,
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD,
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,
NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW,
SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM,
ZW.

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2011 105 182.5 17. Juni 2011 (17.06.2011) DE

(71) **Anmelder** (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme
von US): **FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR
FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG
E.V.** [—/DE]; Hansastraße 27c, 80686 München (DE).
ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT FREIBURG
[—/DE]; Fahnbergplatz, 79098 Freiburg (DE).

(84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,
GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ,
TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ,

(72) **Erfinder; und**

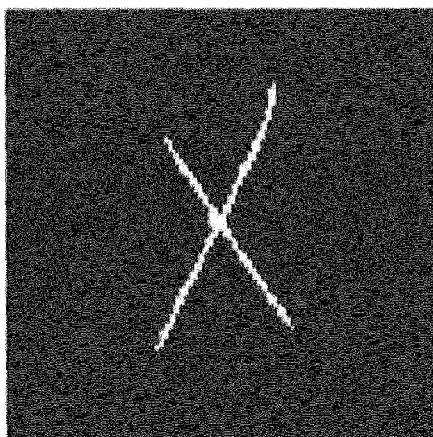
(75) **Erfinder/Anmelder** (nur für US): **DEMAN, Matthias**
[DE/DE]; Meisenbergweg 4, 79104 Freiburg (DE). **REIN,**

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) **Title:** METHOD FOR PROVIDING A PREDICTION MODEL FOR CRACK DETECTION AND METHOD FOR CRACK
DETECTION ON A SEMICONDUCTOR STRUCTURE

(54) **Bezeichnung :** VERFAHREN ZUR BEREITSTELLUNG EINES VORHERSAGEMODELLS FÜR EINE RISSDETEKTION
UND VERFAHREN ZUR RISSDETEKTION AN EINER HALBLEITERSTRUKTUR

Figur 4



(57) **Abstract:** The invention relates to a method for
providing a prediction model for crack detection on a
semiconductor structure that is a photovoltaic solar cell, a
precursor of a photovoltaic solar cell in the production
process, more particularly a semiconductor material for
producing a solar cell, the method comprising the following
steps: A) provision of a reference semiconductor structure
having at least one crack; B) provision of crack data for the
at least one crack, the crack data comprising geometric
position data regarding the position of the crack on the
reference semiconductor structure; C) spatially resolved
scanning of the reference semiconductor structure by
spatially resolved measurement of a plurality of spatial
measurement points of the photoluminescence generated in
the semiconductor structure and/or spatially resolved
measurement of IR absorption of the semiconductor
structure, and D) creation of a prediction model by training a
learning algorithm on the basis of the spatially resolved
measurement data acquired in step C and the crack data
provided in step B, the training of the learning algorithm
comprising the following steps: D1) creation of at least one
descriptor for at least one spatial descriptor point by
specifying or determining a test region for the descriptor
point and creating the descriptor on the basis of the
measurement data inside the test region, which descriptor is a
feature vector and/or a feature distribution and/or a feature

histogram, and D2) training the learning algorithm by means of the descriptor and the crack data. The invention further relates to a
method and a device for crack detection.

(57) **Zusammenfassung:**

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



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, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bereitstellung eines Vorhersagemodells für eine Rissdetektion an einer Halbleiterstruktur, welche Halbleiterstruktur eine photovoltaische Solarzelle, eine Vorstufe einer photovoltaischen Solarzelle im Herstellungsprozess, insbesondere Halbleitermaterial zur Herstellung einer Solarzelle, ist, welche folgende Verfahrensschritte umfasst: A. Bereitstellen einer Referenz-Halbleiterstruktur, welche Referenz-Halbleiterstruktur mindestens einen Riss aufweist; B. Bereitstellen von Rissdaten zu dem mindestens einen Riss, welche Rissdaten geometrische Ortsdaten hinsichtlich der Lage des Risses auf der Referenz-Halbleiterstruktur umfassen; C. Ortsaufgelöste Vermessung der Referenz-Halbleiterstruktur durch ortsaufgelöste Messung für eine Mehrzahl von örtlichen Messpunkten von in der Halbleiterstruktur erzeugter Photolumineszenzstrahlung und/oder ortsaufgelöster Messung der IR-Absorption der Halbleiterstruktur, und D. Erstellen eines Vorhersagemodells mittels Trainieren eines Lernalgorithmus anhand der in Verfahrensschritt C ermittelten ortsaufgelösten Messdaten und der in Verfahrensschritt B bereitgestellten Rissdaten, wobei das Trainieren des Lernalgorithmus folgende Verfahrensschritte umfasst: D1) Erstellen mindestens eines Deskriptors für mindestens einen örtlichen Deskriptorpunkt, indem für den Deskriptorpunkt eine Prüfregion vorgegeben oder ermittelt wird und anhand der Messdaten innerhalb der Prüfregion der Deskriptor erstellt wird, welcher Deskriptor ein Merkmalsvektor und/oder eine Merkmalsverteilung und/oder ein Merkmalshistogramm ist, und D2) Trainieren des Lernalgorithmus mittels des Deskriptors und der Rissdaten. Die Erfindung betrifft weiterhin ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Rissdetektion.

Verfahren zur Bereitstellung eines Vorhersagemodells für eine Rissdetektion
und Verfahren zur Rissdetektion an einer Halbleiterstruktur

5

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bereitstellung eines Vorhersagemodells
10 für eine Rissdetektion an einer Halbleiterstruktur gemäß Anspruch 1 sowie ein
Verfahren zur Rissdetektion an einer Halbleiterstruktur gemäß Anspruch 2. Die
Halbleiterstruktur ist eine photovoltaische Solarzelle, eine Vorstufe einer photo-
voltatischen Solarzelle im Herstellungsprozess oder insbesondere Halbleiterma-
terial zur Herstellung einer solchen photovoltaischen Solarzelle.

15

Photovoltaische Solarzellen, welche aus Halbleitermaterial aufgebaut sind, wer-
den seit langem zur Umwandlung von elektromagnetischer Strahlung in elektri-
sche Energie verwendet. Bei typischen photovoltaischen Solarzellen stellt das
Halbleitermaterial einen erheblichen Anteil an den Gesamtkosten zur Herstel-
20 lung der Solarzelle dar. Daher finden verstärkt kostengünstigere Materialien, wie
beispielsweise multikristallines Silizium Anwendung und darüber hinaus besteht
ein Ziel der Solarzellenforschung darin, die Dicke der verwendeten Halbleiter-
wafer bei der Herstellung der photovoltaischen Solarzelle zu verringern, um so-
mit die Materialkosten zu verringern.

25

Hierdurch erhöht sich jedoch das Risiko, dass aufgrund von Rissen die Stabilität
des Halbleitermaterials beeinträchtigt wird. Solche Risse können beispielsweise
aufgrund von Materialdefekten in einem Silizium-Rohblock entstehen, aufgrund
von Belastungen bei der Produktion des Wafer-Rohmaterials, durch Defekte und
30 mechanische Spannung beim Sägen der Wafer sowie durch mechanische Bean-
spruchung bei Transport und Handhabung. Zusätzlich wird das Halbleitermateri-
al im Herstellungsprozess mechanischen und thermischen Belastungen ausge-
setzt.

35 Sofern das Halbleitermaterial im Herstellungsprozess zerbricht, entstehen hohe
Kosten, da unter anderem die Produktion gestoppt werden muss. Doch auch

solches Halbleitermaterial, welches trotz eines Risses den gesamten Herstellungsprozess durchläuft, kann bei späterer Verwendung zu einem erheblichen Leistungsverlust bei Einsatz der photovoltaischen Solarzelle führen.

- 5 Aus diesem Grund besteht ein hoher Bedarf an Verfahren zur Detektion von Rissen in einer Halbleiterstruktur, welche Halbleiterstruktur das vorgenannte Halbleiter-Rohmaterial, wie beispielsweise ein Halbleiter-Wafer zur Herstellung einer Solarzelle, die Vorstufe einer Solarzelle im Herstellungsprozess oder die fertig produzierte Solarzelle ist. Da die Risse typischerweise Ausdehnungen im
10 Mikrometerbereich aufweisen, werden sie auch als Mikrorisse bezeichnet.

Es ist bekannt, mittels so genannter IR-Durchlicht-Aufnahmen Risse zu detektieren. Hierzu wird die Halbleiterstruktur mittels Strahlung im Infrarotbereich einer Durchlicht-Messung unterzogen und mittels eines bildgebenden Verfahrens, wie
15 beispielsweise einer CCD-Kamera vermessen. Aufgrund der unterschiedlichen Absorption im IR-Bereich kann in dem derart erhaltenen Bild ein Benutzer mit dem Auge Risse erkennen. Ebenso ist die Rissdetektion mittels Photolumineszenz bekannt: Hierzu wird in der Halbleiterstruktur Photolumineszenzstrahlung erzeugt und mittels eines bildgebenden Verfahrens, wie beispielsweise einer
20 CCD-Kamera orts aufgelöst vermessen. Die Anwendung von Photolumineszenzmessungen ist grundsätzlich bekannt und beispielsweise in *Trupke, T. Progress with luminescence imaging for the characterisation of silicon wafers and solar cells. in Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference. 2007. Mailand, Italien.* beschrieben. Hierbei ist es jedoch häufig nicht
25 möglich, Risse von anderen Effekten wie beispielsweise rekombinationsaktiven Störstellen zu unterscheiden.

Darüber hinaus ist die Rissdetektion mittels Resonance Ultrasonic Vibration (RUV) bekannt und beispielsweise in *Monastyrskiy, A., et al. Resonance Ultrasonic Vibrations for In-line Crack Detection in Silicon Wafers and Solar Cells. in Proceedings of 33rd PVSC. 2008.* beschrieben.
30

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein zuverlässiges und insbesondere industriell einsetzbares Verfahren zur Rissdetektion bei einer Halbleiterstruktur,
35 welche eine photovoltaische Solarzelle, eine Vorstufe im Herstellungsprozess

einer photovoltaischen Solarzelle oder Rohmaterial zur Herstellung der photovoltaischen Solarzelle ist, zu schaffen.

5 Gelöst ist diese Aufgabe durch ein Verfahren zur Bereitstellung eines Vorhersagemodells für eine Rissdetektion an einer Halbleiterstruktur gemäß Anspruch 1 sowie durch ein Verfahren zur Rissdetektion an einer Halbleiterstruktur gemäß Anspruch 2. Vorteilhafte Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen Verfahren finden sich in den Ansprüchen 3 bis 13. Die Erfindung ist weiterhin gelöst durch eine Vorrichtung zur Rissdetektion an einer Halbleiterstruktur gemäß Anspruch 10 14. Hiermit wird der Wortlaut sämtlicher Ansprüche per Referenz in die Beschreibung eingebunden.

Die Erfindung ist in der Erkenntnis des Anmelders begründet, dass Lernalgorithmen geeignet sind, ein Vorhersagemodell für eine Rissdetektion an einer Halbleiterstruktur zu erstellen, so dass anhand des Vorhersagemodells eine Rissdetektion erfolgt. Die erfindungsgemäßen Verfahren und die erfindungsgemäße Vorrichtung unterscheidet sich somit grundsätzlich von den bisher im Photovoltaikbereich verwendeten Verfahren zur Rissdetektion, da erstmalig maschinelles Lernen mittels eines Lernalgorithmus zur Rissdetektion verwendet wird.

20 Wie vorhergehend beschrieben beziehen sich die erfindungsgemäßen Verfahren und die erfindungsgemäße Vorrichtung zur Rissdetektion auf den Photovoltaikbereich. Entsprechend wird der Begriff Halbleiterstruktur hierbei und im Folgenden verwendet, um Rohmaterial wie beispielsweise Siliziumwafer und insbesondere multikristalline Siliziumwafer zur Herstellung einer Solarzelle zu bezeichnen, ebenso die Vorstufe einer photovoltaischen Solarzelle an einem beliebigen Punkt im Herstellungsprozess sowie die fertiggestellte Solarzelle.

30 Das erfindungsgemäße Verfahren zur Bereitstellung eines Vorhersagemodells für eine Rissdetektion an einer Halbleiterstruktur umfasst folgende Verfahrensschritte:

In einem Verfahrensschritt A wird eine Referenz-Halbleiterstruktur bereitgestellt, welche Referenz-Halbleiterstruktur mindestens einen Riss aufweist.

In einem Verfahrensschritt B werden Rissdaten bereitgestellt zu dem mindestens einen Riss. Die Rissdaten umfassen geometrische Ortsdaten hinsichtlich der Lage des Risses auf der Referenz-Halbleiterstruktur.

5 Die Halbleiterstruktur stellt typischerweise ein flächiges Element dar, so dass der Riss typischerweise hinsichtlich der Lage der Vorder- oder Rückseite der Halbleiterstruktur beschrieben werden kann, das heißt typischerweise mittels zweidimensionaler geometrischer Daten. Hierbei liegt es im Rahmen der Erfindung, dass die Rissdaten eine Vielzahl von Punkten und/oder Linien, welche die
10 Ausdehnung des Risses beschreiben, umfassen und/oder dass die Rissdaten ein Risszentrum, an welchem sich mindestens zwei Linien eines sternförmigen Risses kreuzen, umfassen.

Ebenso liegt es im Rahmen der Erfindung, dass die Referenz-Halbleiterstruktur
15 eine Halbleiterstruktur ist, welche einen Riss aufweist, welcher Riss mittels einer weiteren Messmethode hinsichtlich der geometrischen Lage vermessen wurde. Alternativ oder zusätzlich ist es ebenso möglich, den Riss durch Kratzen oder ähnliche Verfahren der Referenz-Halbleiterstruktur an einer vorgegebenen geometrischen Position zuzufügen.

20 In einem Verfahrensschritt C erfolgt die orts aufgelöste Vermessung der Referenz-Halbleiterstruktur. Hierzu wird für eine Mehrzahl von örtlichen Messpunkten eine orts aufgelöste Messung von in der Halbleiterstruktur erzeugter Photolumineszenzstrahlung und/oder orts aufgelöster Messung der Infrarot-Absorption (IR-Absorption) der Halbleiterstruktur durchgeführt. Zur Durchführung dieser orts-
25 aufgelösten, bildgebenden Verfahren sind an sich bekannte Messapparaturen und insbesondere CCD-Kameras zur orts aufgelösten Vermessung verwendbar. Wesentlich ist, dass eine orts aufgelöste Vermessung für eine Vielzahl von örtlichen Messpunkten erfolgt. Die Messpunkte überdecken zumindest einen Be-
30 reich auf der Oberfläche der Halbleiterstruktur, welcher den Riss umfasst.

In einem Verfahrensschritt D erfolgt die Erstellung eines Vorhersagemodells. Hierzu wird ein Lernalgorithmus trainiert, anhand der in Verfahrensschritt C ermittelten orts aufgelösten Messdaten und der in Verfahrensschritt B bereitge-
35 stellten Rissdaten.

Im Unterschied zu vorbekannten Verfahren zur Rissdetektion wird insbesondere nicht ein physikalisches Modell zugrunde gelegt, um anhand der Messsignale diejenigen Messpunkte, welche einem Riss zugeordnet sind, von den anderen Messpunkten zu unterscheiden. Stattdessen erfolgt anhand der Messdaten und der Rissdaten, das heißt der hinsichtlich der Referenz-Halbleiterstruktur be-
5 kannten Beschreibung zu dem vorhandenen Riss, ein Trainieren eines Lernalgorithmus. Die Spezifikationen und Kriterien (d.h. die Ausprägungen dieser Beschreibungen), welche den Riss kennzeichnen und hinsichtlich der Messsignale von anderen Elementen, wie beispielsweise rekombinationsaktiven geometri-
10 schen Strukturen unterscheiden, werden somit nicht vorgegeben, sondern durch Trainieren des Lernalgorithmus ausgebildet.

Das Trainieren des Lernalgorithmus umfasst hierbei folgende Verfahrensschritte:

15 In einem Verfahrensschritt D1 wird mindestens ein Deskriptor für mindestens einen örtlichen Deskriptorpunkt erstellt. Hierbei wird für den Deskriptorpunkt eine Prüfregion vorgegeben oder ermittelt und anhand der Messdaten innerhalb der Prüfregion wird der Deskriptor erstellt, welcher Deskriptor einen Merkmalsvektor und/oder eine Merkmalsverteilung und/oder ein Merkmalshistogramm ist.
20

Die Prüfregion umfasst somit zumindest eine Teilmenge der Messpunkte aus Verfahrensschritt C. Ebenso liegt es im Rahmen der Erfindung, dass die Prüfregion sämtliche Messpunkte aus Verfahrensschritt C umfasst.

25 Der Deskriptorpunkt ist ein örtlicher Punkt für den der genannte Deskriptor gebildet wird, so dass anhand des Merkmalsvektors und/oder der Merkmalsverteilung und/oder des Merkmalshistogramms eine Beschreibung für den örtlichen Deskriptorpunkt unter Berücksichtigung der Prüfregion ausgebildet wird. Die
30 Merkmale des Merkmalsvektors und/oder der Merkmalsverteilung und/oder des Merkmalshistogramms basieren auf den in Verfahrensschritt C ermittelten Messdaten. Hierbei liegt es im Rahmen der Erfindung, dass die Merkmale unmittelbar aus den Messdaten hervorgehen. Insbesondere ist es jedoch vorteilhaft, dass die Merkmale eine Weiterverarbeitung und/oder Korrelation, insbesondere
35 eine Strukturbeschreibung mehrerer Messdaten sind.

In einem Verfahrensschritt D2 erfolgt ein Trainieren des Lernalgorithmus mittels des Deskriptors und der Rissdaten.

Das Trainieren kann in an sich bekannter Weise mit einem an sich bekannten Lernalgorithmus durchgeführt werden. Ebenso liegt es im Rahmen der Erfindung, den Lernalgorithmus lediglich mittels eines Deskriptorpunktes und zugeordnetem Deskriptor und/oder mittels lediglich eines Risses und den zugeordneten geometrischen Daten zu trainieren. Vorteilhafterweise erfolgt das Training jedoch mit einer Vielzahl von Deskriptorpunkten und entsprechend erstellten Deskriptoren. Alternativ und insbesondere zusätzlich ist es vorteilhaft, mit einer Mehrzahl von Rissen und jeweils zugeordneten Rissdaten das genannte Verfahren durchzuführen.

Das Trainieren des Lernalgorithmus kann, wie bereits beschrieben in an sich bekannter Weise erfolgen. Wesentlich hierbei ist, dass aufgrund der vorgegebenen Rissdaten bekannt ist, ob an dem Deskriptorpunkt ein Riss vorliegt oder nicht. Diese Information ist entscheidend für die durch den Lernalgorithmus während des Trainierens durchgeführte Ausbildung einer Klassifizierung.

Es liegt im Rahmen der Erfindung, mehrere Referenz-Halbleiterstrukturen zum Trainieren des Lernalgorithmus zu verwenden. Es ist hierbei nicht zwingend notwendig, dass jede Referenz-Halbleiterstruktur einen Riss aufweist, da zum Trainieren auch Deskriptorpunkte und Deskriptoren, an denen kein Riss vorliegt, sinnvoll sind. Mindestens eine Referenz-Halbleiterstruktur muss jedoch mindestens einen Riss aufweisen, wie zuvor beschrieben.

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Rissdetektion an einer Halbleiterstruktur umfasst folgende Verfahrensschritte:

In einem Verfahrensschritt A erfolgt ein Bereitstellen der Halbleiterstruktur.

Im Unterschied zu der Referenz-Halbleiterstruktur ist bei der Halbleiterstruktur zur Durchführung der Rissdetektion selbstverständlich die geometrische Lage des Risses bzw. die Information, ob überhaupt die Halbleiterstruktur ein Riss aufweist, nicht vorbekannt.

In einem Verfahrensschritt B wird ein Vorhersagemodell bereitgestellt. Das Vorhersagemodell wurde durch Trainieren eines Lernalgorithmus erstellt, vorzugsweise mittels eines Verfahrens gemäß Anspruch 1 bzw. einer vorteilhaften Ausführungsform hiervon.

5

In einem Verfahrensschritt C erfolgt eine orts aufgelöste Vermessung der Halbleiterstruktur durch orts aufgelöste Messung für eine Mehrzahl von örtlichen Messpunkten von in der Halbleiterstruktur erzeugter Photolumineszenzstrahlung und/oder orts aufgelöster Messung der IR-Absorption der Halbleiterstruktur. Verfahrensschritt C kann somit identisch zu Verfahrensschritt C gemäß Anspruch 1 bzw. einer vorteilhaften Ausführungsform hiervon ausgebildet sein. Insbesondere ist es vorteilhaft, bei der Erstellung des Vorhersagemodells und bei der Rissdetektion die gleiche Messart, das heißt jeweils eine orts aufgelöste Messung von Photolumineszenzstrahlung oder jeweils eine orts aufgelöste Messung der IR-Absorption durchzuführen.

10

In einem Verfahrensschritt D erfolgt für mindestens einen örtlichen Prüfpunkt eine Bestimmung, ob sich an diesem Prüfpunkt ein Riss befindet. Der örtliche Prüfpunkt stellt einen Punkt auf einer Oberfläche der Halbleiterstruktur dar und entspricht vorzugsweise einem der Messpunkte gemäß Verfahrensschritt C.

15

Die Bestimmung umfasst folgende Verfahrensschritte:

In einem Verfahrensschritt D1 wird mindestens ein Deskriptor für den Prüfpunkt erstellt, in dem für den Prüfpunkt eine Prüfregion vorgegeben und ermittelt wird und anhand der Messdaten innerhalb der Prüfregion der Deskriptor erstellt, welcher Deskriptor einen Merkmalsvektor und/oder eine Merkmalsverteilung und/oder ein Merkmalshistogramm ist.

20

Verfahrensschritt D1 bei der Rissdetektion ist somit analog ausgebildet zu Verfahrensschritt D1 bei der Erstellung des Vorhersagemodells gemäß Anspruch 1, wobei in Anspruch 1 der Deskriptor für einen entsprechenden Deskriptorpunkt und in Anspruch 2 der Deskriptor für einen entsprechenden Prüfpunkt erstellt wird. Sämtliche vorangehenden und nachfolgenden Ausführungen zur Deskriptorerstellung können somit – zumindest in Analogie – sowohl hinsichtlich Verfah-

25

30

35

rensschritt D1 gemäß Anspruch 1, als auch hinsichtlich Verfahrensschritt D1 gemäß Anspruch 2 herangezogen werden.

Auch bei der Rissdetektion ist somit wesentlich, dass für den Prüfpunkt ein Deskriptor erstellt wird, welcher somit Merkmale in Form eines Merkmalsvektors und/oder einer Merkmalsverteilung und/oder eines Merkmalshistogramms darstellt, so dass Eigenschaften für den Prüfpunkt unter Berücksichtigung der in Verfahrensschritt C erhaltenen Messdaten innerhalb der Prüfregion in dem Deskriptor abgebildet sind.

In einem Verfahrensschritt D2 erfolgt mittels des Deskriptors und des Vorhersagemodells eine Bestimmung, ob sich an dem Prüfpunkt ein Riss befindet.

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Rissdetektion zeichnet sich somit dadurch aus, dass lediglich ein Vorhersagemodell beispielsweise mittels Durchführung eines Verfahrens gemäß Anspruch 1 zur Verfügung gestellt werden muss und anschließend eine Messung gemäß Verfahrensschritt C in an sich bekannter Weise als Photolumineszenzmessung oder Messung der IR-Absorption durchgeführt wird und durch Deskriptorbildung eine Bestimmung mittels des Vorhersagemodells möglich ist, ob sich an dem Prüfpunkt ein Riss befindet.

Hierbei liegt es im Rahmen der Erfindung, die vorgenannte Bestimmung gemäß Verfahrensschritt D2 lediglich an einem Prüfpunkt durchzuführen. Vorzugsweise wird die Bestimmung an einer Vielzahl von Prüfpunkten durchgeführt. So liegt es im Rahmen der Erfindung, dass sukzessive jeder der örtlichen Messpunkte, an den in Verfahrensschritt C eine Messung erfolgt, als Prüfpunkt ausgewählt wird.

Im Ergebnis ist somit sowohl die Bestimmung, ob die Halbleiterstruktur einen Riss aufweist als auch die Bestimmung der geometrischen Lage und/oder Ausdehnung des Risses mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Rissdetektion gewährleistet, ohne dass durch Hypothesen, Vorgaben oder Ableitungen aus einem physikalischen Modell ein Zusammenhang zwischen den Messdaten gemäß Verfahrensschritt C und abstrakten Risseigenschaften vorgegeben werden muss.

Untersuchungen des Anmelders haben gezeigt, dass die Ausbildung eines Vorhersagemodells gemäß Anspruch 1 und die Anwendung gemäß Anspruch 2 hervorragend zur Detektion von Rissen in einer Halbleiterstruktur geeignet ist. Das erfindungsgemäße Verfahren zur Rissdetektion stellt somit eine erhebliche Verbesserung gegenüber vorbekannter Verfahren zur Rissdetektion dar. Insbesondere kann anhand des Trainieren des Lernalgorithmus bei Durchführung des Verfahrens gemäß Anspruch 1 auch bei Verwendung einer Photolumineszenz-Messmethode in den jeweiligen Verfahrensschritten C eine Unterscheidung mit hoher Treffergenauigkeit zwischen einem Riss einerseits und anderen geometrischen Strukturen wie beispielsweise rekombinationsaktiven Strukturen getroffen werden, wobei die Kriterien zur Unterscheidung einer Rissstruktur von anderen Strukturen nicht vorgegeben werden müssen, sondern lediglich durch Trainieren des Lernalgorithmus ausgebildet werden.

Die erfindungsgemäßen Verfahren weisen weiterhin den Vorteil auf, dass eine Aufteilung zwischen Erstellen des Vorhersagemodells einerseits und Anwenden des Vorhersagemodells zur Rissdetektion möglich ist:

So kann beispielsweise herstellerseitig ein Lernalgorithmus mit hoher Genauigkeit durch exakte Präparation einer Referenz-Halbleiterstruktur und/oder Trainieren anhand einer Vielzahl von Rissen und Rissdaten trainiert werden und das derart ausgebildete Vorhersagemodell dem Benutzer zur Verfügung gestellt werden.

Es ist somit nicht zwingend notwendig, auch benutzerseitig ein Trainieren des Lernalgorithmus durchzuführen. Der Benutzer kann ebenso das herstellerseitig trainierte Vorhersagemodell direkt zur Rissdetektion anwenden.

Vorzugsweise erfolgt bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Rissdetektion in einem Verfahrensschritt E eine Rissrekonstruktion, in dem die geometrischen Daten der Rissausprägung ermittelt werden. Hiermit wird somit ausgehend von einem Prüfpunkt, welcher einem Riss zugeordnet wurde, eine Rekonstruktion durchgeführt, um zumindest die teilweise, vorzugsweise die vollständige geometrische Ausprägung eines Risses zu ermitteln. Insbesondere ist es vorteilhaft, in Verfahrensschritt E für eine örtliche Rekonstruktionsregion um den Prüfpunkt für jeden Messpunkt innerhalb der Rekonstruktionsregion eine Orientierung zu

ermitteln und mittels eines Ähnlichkeitsvergleiches mit einem sternförmigen und/oder linienförmigen Muster durch Mustererkennung die dem Riss zugehörigen Messpunkte zu ermitteln. Vorgenannte vorzugsweise Ausführungsformen sind insbesondere bei Verwendung von Photolumineszenz-Messverfahren und
5 insbesondere bei Verwendung von multikristallinen Silizium-Halbleiterstrukturen vorteilhaft.

Diese vorzugsweise Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens ist in der Erkenntnis des Anmelders begründet, dass typischerweise Risse in Halb-
10 leiterstrukturen ein sternförmiges Muster aufweisen. Hierdurch kann mit einer Kombination von an sich bekannten Verfahren zur Erkennung und Rekonstruktion eines sternförmigen und/oder linienförmigen Musters eine Rissrekonstruktion erfolgen.

Wie vorhergehend beschrieben, liegt es im Rahmen der Erfindung, in Verfahrensschritt D bei Erstellung des Vorhersagemodells und/oder bei der Rissdetektion eine Vielzahl von Ortspunkten sukzessive als Deskriptorpunkte bzw. Prüfpunkte zugrunde zu legen. Hierbei können beispielsweise sämtliche in den jeweiligen Verfahrensschritten C vermessenen örtlichen Messpunkte verwendet werden.
20

Vorteilhaft ist es jedoch, die Menge der Deskriptorpunkte und/oder Prüfpunkte einzuschränken, mittels Verfahren zur Schlüsselpunktbestimmung. Solche Verfahren sind auch als Verfahren zur Ermittlung eines Point of Interest (POI) bekannt. Insbesondere ist es vorteilhaft, zur Festlegung des Deskriptorpunktes und/oder des Prüfpunktes ein Verfahren zum Auffinden von Schlüsselpunkten zu verwenden, vorzugsweise die Schlüsselpunktbestimmung gemäß mindestens einem der Verfahren SIFT, GLOH und/oder SURF oder bekannten Verfahren zur Merkmalsdetektion wie dem Canny- oder Harris-Detektor oder hierzu ähnlicher, abgeleiteter oder analoger Verfahren zu verwenden. Die vorgenannten Verfahren sind an sich bekannt und beispielsweise beschrieben in:
25 30

- **GLOH:** Krystian Mikolajczyk and Cordelia Schmid "A performance evaluation of local descriptors", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 10, 27, pp 1615--1630, 2005.

- **SIFT:** Lowe, David G. (1999). "Object recognition from local scale-invariant features". *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*. 2. pp. 1150–1157. doi:10.1109/ICCV.1999.790410. <http://doi.ieeeecs.org/10.1109/ICCV.1999.790410>.
- **SURF:** Bay, H., Tuytelaars, T., Gool, L.V., "SURF: Speeded Up Robust Features", *Proceedings of the ninth European Conference on Computer Vision*, May 2006.
- **Harris:** C. Harris and M. Stephens: *A combined corner and edge detector*. In: *Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*. 1988, S. 147-151.

Untersuchungen des Anmelders haben ergeben, dass es zur Schlüsselpunktbestimmung insbesondere vorteilhaft ist, den mindestens einen Schlüsselpunkt mittels eines orientierungssteuerbaren Filters zu bestimmen. Vorteilhafterweise erfolgt die Bestimmung mittels eines Filters, insbesondere zur Berechnung einer Ableitung der Messdaten, bevorzugt der zweiten Ableitung. Untersuchungen des Anmelders haben ergeben, dass insbesondere ein Balkenfilter, der aus der zweiten Ableitung eines Gaussfilters gebildet wird, zur Schlüsselpunktbestimmung geeignet ist.

Zur Auswahl der Schlüsselpunkte liegt es im Rahmen der Erfindung, die Schlüsselpunkte innerhalb des gesamten Bereiches, insbesondere ausgehend von sämtlichen Messpunkten zu bestimmen. Ebenso liegt es im Rahmen der Erfindung, eingeschränkte geometrische Bereiche auf der Oberfläche der Halbleiterstruktur und/oder eine Teilmenge der in Verfahrensschritt C vermessenen Messpunkte vorzugeben, innerhalb derer Schlüsselpunkte bestimmt werden.

Bei der Bestimmung der Schlüsselpunkte können zur Bestimmung relevanter Bildausschnitte unterschiedliche Eigenschaften und Merkmale einer örtlichen Region oder eines Messpunktes dienen, wie beispielsweise die Ausprägung von Intensitäten des Messsignals, oder die Verteilung der Intensitätswerte des Messsignals. Diese Merkmale können beispielsweise über die Bestimmung von Momenten wie Varianz, Mittelwert, Symmetrie oder anderer an sich bekannte Momente abgebildet und zur Bestimmung des Schlüsselpunktes verwendet werden.

Ebenso ist die Verwendung der Ausprägung von Merkmalen wie beispielsweise Ecken, Kanten, Linien oder runden Strukturen hinsichtlich der geometrischen Ausprägung möglich. Solche Merkmale können beispielsweise aus Filterantworten

ten bei Verwendung von Filtern und/oder aus der Kombination mehrerer Filtern – gegebenenfalls mit Vor- und Weiterverarbeitung der Ergebnisse – ermittelt werden. Beispiele für anwendbare Filter sind Sobel-, Prewitt-, Gaussfilter, Difference-of-Gaussian, Laplacian-of-Gaussian. Ebenso liegt die Verwendung von Tensoren wie beispielsweise Harris-Detektor, Determinant of Hessian im Rahmen der Erfindung oder die Verwendung steuerbarer Filter, die Verwendung von Wavelets wie beispielsweise Gabor- und Haarwavelets. Weiterhin liegt die Verwendung des SUSAN-Eckendetektors oder des Canny-Kantendetektors im Rahmen der Erfindung.

Untersuchungen des Anmelders ergaben, dass insbesondere vorteilhaft die Filterung mit anisotropen Balkenfiltern ist, welche die zweite Ableitung des Gaussfilters darstellen und beispielsweise in J. Malik, Contour and Texture Analysis for Image Segmentation. International Journal of Computer Vision 43(1), pp. 7–27, 2001 beschrieben sind.

Hierbei ist es insbesondere vorteilhaft, diese Filter mit unterschiedlichen Raumorientierungen zu verwenden. Hierbei werden die positiven Filterantworten bei unterschiedlicher räumlicher Orientierung des Filters korreliert, vorzugsweise aufsummiert. Es erfolgt somit eine Form der Haar-Integration über die Rotationsgruppe $SO(2)$, wie beispielsweise beschrieben in H. Schulz-Mirbach. Anwendung von Invarianzprinzipien zur Merkmalgewinnung in der Mustererkennung. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, feb 1995. Reihe 10, Nr. 372, VDI-Verlag.

Untersuchungen des Anmelders ergaben, dass der hieraus resultierende Wert insbesondere im Zentrum eines Risses erhöht ist und darüber hinaus rotationsinvariant ist. Hierdurch kann somit in einfacher Weise ein Risszentrum unabhängig von der Rotation, das heißt des aktuellen Verlaufs der Risslinien auf dem jeweiligen Messbild ermittelt werden. Hierdurch wird der vorteilhafte Effekt erzielt, dass unabhängig von der Rotation der Risse oder der Halbleiterstruktur bei der Messung gleichermaßen hohe Werte bei der Analyse erhalten und somit gleichermaßen detektiert werden.

Weiterhin liegt die Verwendung von Filtern mit verschiedenen Skalen im Rahmen der Erfindung. Hierdurch wird ein robustes Ergebnis gegenüber Größenveränderungen der Risse erhalten.

- 5 Insbesondere vorteilhaft dabei ist es, die Auswertung der Ergebnisse auf verschiedenen Skalenniveaus zur Abschätzung der Größe des zu berücksichtigenden Bereiches heranzuziehen: Entsprechend hohe Ergebnisse auf einem hohen Skalenniveau deuten somit auf einen größeren Riss hin, so dass vorteilhafterweise ein größerer Bildausschnitt zur Bestimmung der Schlüsselpunkte, zur
10 Rissdetektion und/oder zur Rissrekonstruktion zugrunde gelegt wird, verglichen mit Ergebnissen, bei denen auf niedrigeren Skalenniveaus Ergebnisse vorliegen.

- Generell ergibt sich durch die Ermittlung von Schlüsselpunkten der Vorteil, dass
15 die Zahl der potentiellen Rissregionen auf eine deutlich geringere Menge von Schlüsselpunkten eingeschränkt werden kann und somit eine Beschleunigung des Verfahrens erzielt wird.

- Ebenso liegt es im Rahmen der Erfindung, zunächst Schlüsselpunkte mittels
20 anderer Messmethoden zu bestimmen. Hierbei kann beispielsweise das Detektionsergebnis einer IR-Messung in herkömmlicher Weise verwendet werden, um Schlüsselpunkte zu bestimmen. Ebenso können unterschiedliche Messmethoden kombiniert werden: So liegt beispielsweise die Bestimmung von Schlüsselpunkten anhand einer IR-Messung im Rahmen der Erfindung, worauf eine Photolumineszenzmessung für die zuvor mittels der IR-Messung erzielten Schlüsselpunkte
25 zur Rissdetektion ausgewertet wird.

- Vorzugsweise wird der Deskriptor in Verfahrensschritt D1 gemäß Anspruch 1 und/oder Anspruch 2 gemäß mindestens einem der Verfahren SIFT, GLOH,
30 HOG, LESH und/oder SURF und/oder einer Variante dieser Verfahren, bei denen ein Deskriptor anhand der Merkmale einer Prüfregion erzeugt wird ermittelt. Alternativ oder zusätzlich ist es vorteilhaft, dass zur Erstellung des Deskriptors die maximale Filterantwort eines kalibrierbaren und rotierbaren Filters, vorzugsweise eines wie zuvor beschriebenen Balkenfilters verwendet wird. Auch das
35 LESH-Verfahren ist an sich bekannt und beispielsweise beschrieben in Sarfraz, S., Hellwich, O.: "Head Pose Estimation in Face Recognition across Pose Scena-

rios", Proceedings of VISAPP 2008, Int. conference on Computer Vision Theory and Applications, Madeira, Portugal, pp. 235-242, January 2008 (Best Student Paper Award).

- 5 Insbesondere ist es vorteilhaft, dass der Deskriptor folgende Verfahrensschritte umfassend erstellt wird:

In einem Verfahrensschritt D1.1 erfolgt die Bestimmung einer Amplitude und einer Orientierung für jeden Ortspunkt der Prüfregion, beispielsweise für jeden
10 Messpunkt innerhalb der Prüfregion, vorzugsweise durch Ermitteln einer Kenngröße für jeden Messpunkt der Prüfregion, welche Kenngröße weiter bevorzugt der Gradient des Messwerts für den jeweiligen Messpunkt oder die maximale Filterantwort und Orientierung eines steuerbaren Filters für den jeweiligen Messpunkt ist.

15

In einem Verfahrensschritt D1.2 erfolgt die Erstellung eines Merkmalshistogramms für zumindest ausgewählte Schlüsselpunkte der Prüfregion.

20

Insbesondere vorteilhaft ist es hierbei, dass zusätzlich eine Risshauptorientierung ermittelt wird und dass eine Korrektur des Merkmalshistogramms anhand der Risshauptorientierung erfolgt, um ein rotationsinvariantes Merkmalshistogramm zu erhalten.

25

Bei der Deskriptorerstellung erfolgt somit eine Beschreibung der Prüfregion um den Deskriptorpunkt bzw. Prüfpunkt anhand von Merkmalen. Diese Merkmalsbeschreibung kann z. B. aus einem oder mehreren Merkmalen, eine Merkmalsverteilung oder deren Kenngrößen oder Histogrammen von bestimmten Ausprägungen dieser Merkmale bestehen. Hierbei können an sich bekannte Merkmalsbeschreibungen gemäß den Deskriptoren unter den an sich bekannten Algorithmen
30 SIFT, GLOH, HOG, LESH oder SURF Anwendung finden. Basis zur Ermittlung der Deskriptoren sind jeweils die in Verfahrensschritt C ermittelten Messdaten.

35

Vorteilhafterweise wird in der zuvor genannten vorzugsweisen Ausführungsform die Risshauptorientierung zwischen den Verfahrensschritten D1.1 und D1.2 ermittelt und in Verfahrensschritt D1.2 erfolgt die Erstellung des Merkmalshistogramms durch Abtasten der Messpunkte innerhalb der Prüfregion mittels eines

Abtastalgorithmus. Vorteilhaft ist hier insbesondere die Verwendung von an sich bekannten Abtastalgorithmen gemäß GLOH und/oder SIFT bzw. Varianten hiervon.

- 5 Zur Erstellung der Deskriptoren kann somit eine bestimmte Abtastung und/oder Einteilung des Bildausschnittes Anwendung finden. Insbesondere sind an sich bekannte Abtastungen gemäß der vorgenannten Algorithmen anwendbar.

- 10 Zur Ausbildung der Deskriptoren kann die Wahl der Merkmale wie an sich in den Algorithmen SIFT, GLOH, HOG, LESH oder SURF bekannt erfolgen.

- 15 Untersuchungen des Anmelders haben ergeben, dass auch hier insbesondere die Verwendung der maximalen Filterantwort des anisotropen Balkenfilters wie zuvor beschrieben vorteilhaft ist. Statt Verwendung der Gradientenorientierung und Gradientenamplitude wie aus SIFT und GLOH bekannt, wird somit vorteilhafterweise die Orientierung und Amplitude des Balkenfilters mit maximaler Filterantwort verwendet.

- 20 Es liegt im Rahmen der Erfindung, bei Erstellung der Deskriptoren die Merkmalsbeschreibung vor- oder nachzubearbeiten. Insbesondere kann durch eine Korrektur des Deskriptors entsprechend der ermittelten Hauptorientierung des Risses Rotationsinvarianz wie zuvor beschrieben erzielt werden. Weiterhin kann durch eine Skalierung und/oder Glättung des Deskriptors Robustheit gegenüber Kontrastveränderungen oder Rauschen erzielt werden.

- 25 Vorzugsweise wird in Verfahrensschritt D1 gemäß Anspruch 1 und/oder gemäß Anspruch 2 die Prüfregion folgende Verfahrensschritte umfassend bestimmt:

- 30 Zunächst erfolgt die Bestimmung mindestens eines örtlichen Schlüsselpunktes wie zuvor insbesondere zu den Ansprüchen 5 und 6 beschrieben.

- Anschließend werden die Messpunkte innerhalb der Prüfregion ermittelt, in dem für die Prüfregion eine geometrische Ausdehnung und Form vorgegeben wird. Vorzugsweise wird für die Prüfregion eine rechteckige, elliptische oder kreisförmige Region vorgegeben, deren Mittelpunkt der Schlüsselpunkt ist.
- 35

In einer vorteilhaften Ausführungsform der erfindungsgemäßen Verfahren wird die geometrische Lage von Korngrenzen als Korngrenzendaten innerhalb der Halbleiterstruktur vorgegeben und/oder mittels eines orts aufgelösten Messverfahrens ermittelt und es erfolgt eine Gewichtung abhängig von den Korngrenzdaten, in dem

- bei Bestimmung eines Schlüsselpunktes wie zuvor beschrieben solche Ortspunkte, welche auf einer Korngrenze liegen, nicht als Schlüsselpunkt gewählt werden oder bei Bestimmung des Schlüsselpunktes mit einer gegenüber den übrigen Ortspunkten geringeren Gewichtung versehen werden und/oder
- bei Erstellung eines Deskriptors in Verfahrensschritt D bei Erstellung des Vorhersagemodells und/oder bei der Rissdetektion solche Ortspunkte, welche auf einer Korngrenze liegen nicht oder mit einer gegenüber den übrigen Ortspunkten geringeren Gewichtung berücksichtigt werden und/oder
- bei Rekonstruktion des Risses, wie zuvor beschrieben, solche Ortspunkte, welche auf einer Korngrenze liegen, nicht oder mit einer gegenüber den übrigen Ortspunkten geringeren Gewichtung berücksichtigt werden.

Diese vorzugsweise Ausführungsform findet somit insbesondere bei Anwendung der erfindungsgemäßen Verfahren auf multikristalline Siliziumwafer Anwendung. Sofern die geometrische Lage der Korngrenzen vorbekannt oder aufgrund der zur Verfügung stehenden Messapparaturen einfach zu ermitteln ist, kann die Fehleranfälligkeit bei der Rissdetektion somit nochmals verringert werden, indem die Information über die Lage der Korngrenzen bei den erfindungsgemäßen Verfahren wie zuvor beschrieben verwendet wird.

Der verwendete Lernalgorithmus zur Erstellung des Vorhersagemodells bzw. zur Durchführung der Rissdetektion kann ein an sich bekannter Lernalgorithmus sein. Insbesondere liegt die Verwendung eines neuronalen Netzes, oder eines Bayes-Klassifikators oder einer Kernel-Maschine im Rahmen der Erfindung. Untersuchungen des Anmelders haben gezeigt, dass insbesondere die Verwendung einer Support-Vektor-Maschine-Algorithmus vorteilhaft ist. Dies ist darin

begründet, dass die Support-Vektor-Maschine zur Lösung der Klassifikationsaufgabe die optimale Hyperebene zur Trennung der Merkmalsbeschreibungen der Klassen „Riss“ und „Kein Riss“ ermittelt. Hierdurch ergibt sich ein erheblicher Vorteil, denn die Trennfläche liegt optimal zwischen den Klassen. Merkmalsbeschreibungen, die nicht an der Klassengrenze liegen, haben keinen negativen Einfluss auf den Verlauf der Grenze. Um die Klassieraufgabe durch eine Trennebene lösen zu können, werden die Daten durch den sogenannten „Kernel-Trick“ in einen höher dimensional Raum abgebildet. Dieses Vorgehen ist an sich bekannt und beispielsweise beschrieben in Bernhard Schölkopf, Alex Smola: *Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond (Adaptive Computation and Machine Learning)*, MIT Press, Cambridge, MA, 2002, ISBN 0-262-19475-9.

Wie zuvor beschrieben, wird mittels des Lernalgorithmus der Zusammenhang zwischen der Merkmalsbeschreibung der Deskriptoren und der bekannten Informationen, ob an dem gegebenen Ortspunkt ein Riss vorliegt oder nicht zur Ausbildung des Vorhersagemodells verwendet. Anhand des Vorhersagemodells können dann anschließend bei der Rissdetektion unbekannte Bildausschnitte bzw. die hierfür gebildeten Deskriptoren als Riss oder Nicht-Riss klassifiziert werden.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Rissdetektion ist es wie zuvor beschrieben vorteilhaft, in Verfahrensschritt E eine Risskonstruktion durchzuführen. Hierbei können die Rissstrukturen auf Basis von Struktureigenschaften der Region um den entsprechenden Prüfpunkt in der betrachteten Prüfregion rekonstruiert werden. Die Struktureigenschaften der zu dem Riss gehörenden Ortspunkte grenzen sich hierbei von Struktureigenschaften ab, welche nicht zu dem Riss gehören. Struktureigenschaften können hierbei Position, Intensitätswerte, Gradienten und Filterantworten sein.

Untersuchungen des Anmelders haben ergeben, dass vorteilhafterweise eine Mustererkennung unter Annahme einer stern- oder linienförmigen Struktur des Risses durchgeführt wird.

Insbesondere ist es vorteilhaft, bei linien- oder sternförmigen Rissen die Rekonstruktion derart auszubilden, dass zunächst ein Risszentrum vorzugsweise wie

zuvor bei der Beschreibung des Auffindens von Schlüsselpunkten erläutert, ermittelt und als Mittelpunkt einer Prüfregion definiert wird.

Anschließend werden Struktureigenschaften der Messpunkte der Prüfregion extrahiert. Die Beschreibung der um den Schlüsselpunkt liegenden Messpunkte wird mit der Beschreibung eines korrespondierenden Punktes eines sternförmigen Musters gemäß der an sich bekannten Mustererkennung verglichen. Strukturen, die eine ähnliche Struktur wie beispielsweise Orientierung wie die Bereiche des sternförmigen Musters zeigen, gehören somit mit hoher Wahrscheinlichkeit zum Riss und können entsprechend als zum Riss gehörig gewertet werden. Zur Berechnung der Ähnlichkeit der Struktureigenschaft kann vorteilhafterweise eine zusätzliche Gewichtung, beispielsweise über die Intensitätswerte des jeweiligen Ortspunktes, Gradienten oder einer entsprechenden Filterantwort erfolgen. Bei einer hohen Ähnlichkeit wird entschieden, ob der Ortspunkt zu einem Riss gehört. Diese Entscheidung kann beispielsweise mit dem an sich bekannten Verfahren der Hysterese ausgehend vom Risszentrum geschehen.

Untersuchungen des Anmelders haben ergeben, dass zur Beschreibung der Struktureigenschaft insbesondere die Orientierung und Intensität der Struktur geeignet ist.

Auch hier hat sich zur Berechnung der Orientierung die Filterung mit den zuvor beschriebenen anisotropen Balkenfiltern in verschiedenen Orientierungen als vorteilhaft erwiesen. Vorteilhafterweise wird hierbei die maximale Filterantwort und dessen Orientierung als Information über die Struktur verwendet.

Weitere Merkmale und vorzugsweisen Ausgestaltungen der Erfindung werden im Folgenden anhand von Figuren und Ausführungsbeispielen erläutert. Dabei zeigt:

Figur 1 in Teilbild a) eine Photolumineszenzaufnahme eines multikristallinen Siliziumwafers, welcher in etwa mittig einen Riss aufweist, wobei in Teilbild b) eine Ausschnittsvergrößerung der Region um den Riss abgebildet ist;

Figur 2 eine Darstellung einer maximalen Filterantwort bei Anwendung eines Balkenfilters für die den Riss enthaltende Region;

Figur 3 in Teilbild a) ein ungeglättetes Orientierungshistogramm der Umgebung des Risses und in Teilbild b) das Orientierungshistogramm nach Glättung und

Figur 4 das Ergebnis nach Rissrekonstruktion.

Anhand der Figuren werden Ausführungsbeispiele des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Bereitstellung eines Vorhersagemodells für eine Rissdetektion und des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Rissdetektion erläutert.

Als Referenz-Halbleiterstruktur dient ein multikristalliner Siliziumwafer, der in etwa quadratisch ausgebildet ist, mit einer Kantenlänge von etwa 15,6 cm und einer Dicke von etwa 180 μm . Solche mikrokristallinen Siliziumwafer stellen ein typisches Ausgangsmaterial zur Herstellung photovoltaischer Solarzellen dar.

Zur Ausbildung dieser Halbleiterstruktur als Referenz-Halbleiterstruktur wurde etwa mittig eine Metallspitze, ein so genannter Stößel mittels eines Stößelautomaten aus einer vorgegebenen Fallhöhe in etwa mittig auf die Halbleiterstruktur fallengelassen, so dass sich ein Riss ausbildet und darüber hinaus die geometrische Lage, das heißt, die X- und Y-Koordinaten des Risszentrums, welches mit dem Auftreffpunkt der Metallspitze auf den Wafer übereinstimmt, bekannt ist.

Die derart präparierte Referenz-Halbleiterstruktur wird in einem Verfahrensschritt A bereitgestellt. Darüber hinaus sind wie zuvor beschrieben die Ortskoordinaten des Risszentrums bekannt und werden somit in einen Verfahrensschritt B als Rissdaten bereitgestellt.

In einem Verfahrensschritt C erfolgt die orts aufgelöste Vermessung der Referenz-Halbleiterstruktur. Hierbei wird eine an sich bekannte Apparatur zur Photolumineszenz-Messung verwendet: Durch optische Anregung des Halbleiters mittels Bestrahlen mit elektromagnetischer Strahlung werden Elektronen-Loch-Paare generiert. Aufgrund der Rekombinationsprozesse wird von der Referenz-Halbleiterstruktur Photolumineszenzstrahlung emittiert, welche orts aufgelöst

mittels einer Silizium-CCD-Kamera vermessen wird. Als Ergebnis des Verfahrensschrittes C liegt somit für eine Vielzahl von rasterartig über die Oberfläche der Referenz-Halbleiterstruktur verteilten Messpunkte jeweils ein Messwert vor, welcher der Intensität der emittierten Photolumineszenzstrahlung für diesen
5 Messpunkt entspricht oder zumindest mit der Intensität korreliert.

Das Messergebnis ist in Figur 1a dargestellt. Deutlich ist die hohe Ortsauflösung von (1024x1024) Punkten zu erkennen. Etwa mittig ist bereits ansatzweise eine sternförmige Rissstruktur zu erkennen. Die Region um die Rissstruktur wurde
10 durch ein schwarzes Rechteck gekennzeichnet. Figur 1b zeigt eine Ausschnittsvergrößerung dieses Rechtecks, bei welcher die Rissstruktur (innerhalb des eingezeichneten schwarzen Kreises) deutlicher zu erkennen ist.

Ebenso ist jedoch in den Figuren 1a und 1b ersichtlich, dass eine Vielzahl anderer Strukturen ähnliche Messwerte aufweist und es somit eine hohe Anforderung an das verwendete Verfahren stellt, die einem Riss zugehörigen Messpunkte anhand der Messsignale von den übrigen Messpunkten zu trennen.
15

Daher wird in dem Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens in einem Verfahrensschritt D ein Vorhersagemodell mittels Trainieren eines Lernalgorithmus anhand der in Verfahrensschritt C ermittelten orts aufgelösten Messdaten und der in Schritt B bereitgestellten Rissdaten erstellt:
20

Hierbei wäre es möglich, wie vorhergehend beschrieben für jeden Messpunkt jeweils einen Deskriptor zu erstellen und anschließend den Lernalgorithmus zu trainieren.
25

In dem hier beschriebenen Ausführungsbeispiel erfolgt jedoch zunächst eine Detektion potentieller Risszentren zum Auffinden von Schlüsselpunkten, so dass die Bearbeitungsdauer und der Bearbeitungsaufwand erheblich eingeschränkt
30 wird, da die nachfolgenden Schritte lediglich für die Schlüsselpunkte durchgeführt werden.

Hierbei sind grundsätzlich die zuvor beschriebenen Verfahren zum Auffinden von Schlüsselpunkten (so genannte Points-of-Interest, POI) anwendbar. Untersuchungen des Anmelders haben jedoch gezeigt, dass aufgrund der sternförmigen
35

gen Struktur eines Risses insbesondere die Verwendung anisotroper Balkenfilter zum Auffinden von Schlüsselpunkten vorteilhaft ist. In dem vorliegenden Ausführungsbeispiel wird die zweite Ableitung des anisotropen Gaussfilters verwendet. Dieser Filter wird in verschiedenen Orientierungen erstellt, vorliegend in den

5 Orientierungen $0, \frac{\pi}{6}, \frac{2\pi}{6}, \frac{3\pi}{6}, \frac{4\pi}{6}, \frac{5\pi}{6}$.

Nach der Filterung der Messwerte werden die positiven Filterantworten der einzelnen Balkenfilter aufsummiert. Hierdurch ergibt sich insbesondere im Risszentrum, das heißt in diesem Punkt oder Bereich, in dem sich Risslinien kreuzen, eine hohe Filterantwort. Um die potentiellen Risszentren weiter einzuschränken, werden solche Messpunkte extrahiert, deren aufsummierte Filterantworten einen vorgegebenen Schwellwert überschreiten, vorzugsweise gemäß

10 nachfolgender Formel 1:

$$I_{\text{binary}}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{falls } A(x, y) \geq c \cdot \max(A) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{FORMEL 1})$$

15

Hierbei stellt $A(x, y)$ die Summe der positiven Filterantworten des Bildes mit dem Balkenfilter bei verschiedenen Orientierungen für den Messpunkt mit Koordinaten (x, y) dar. Jedem Messpunkt wird somit ein binärer Wert zugeordnet, welcher 1 gewählt ist, sofern die Filterantwort für diesen Messpunkt größer oder gleich eines Schwellwerts multipliziert mit der maximalen Filterantwort aller

20 Messwerte ist. In den übrigen Fällen wird der Wert 0 zugeordnet. Durch die Wahl des Schwellwerts c wird somit die Empfindlichkeit reguliert, je größer c gewählt wird umso weniger Schlüsselpunkte ergeben sich und umgekehrt. Der Schwellwert c wird empirisch ermittelt, vorzugsweise so, dass alle Risszentren enthalten sind. Es hat sich gezeigt, dass Risszentren in der Regel sehr hohe Werte aufweisen.

30 In Figur 2 ist eine Bearbeitung der Messdaten dargestellt, in dem die jeweils aufsummierten Filterantworten für jeden Pixel dargestellt sind. Deutlich ist zu sehen, dass sich ein besonders hoher Wert im Risszentrum ergibt.

Anschließend werden vorzugsweise zusammenhängende Strukturen auf einen Ortspunkt reduziert. Dies geschieht in an sich bekannter Weise mittels einer morphologischen Operation, bei der Objekte gelocht zu Punkten geschrumpft werden. Das Ergebnis, das heißt die dann verbleibenden Punkte, stellen
5 Schlüsselpunkte dar, wobei jeder dieser Schlüsselpunkte potentiell ein Risszentrum ist.

Für jeden Schlüsselpunkt erfolgt nun in einem Verfahrensschritt D1 jeweils die Erstellung eines Deskriptors. Sukzessive wird somit jeder Schlüsselpunkt als
10 Deskriptorpunkt ausgewählt, jeweils eine Prüfregion für den Deskriptorpunkt vorgegeben und ein Deskriptor erstellt.

Im Folgenden werden zwei Varianten der Deskriptorerstellung beschrieben: Zum einen die Deskriptorerstellung mittels Gradienten und zum anderen die De-
15 skriptorerstellung mittels Balkenfilter.

Bei der Deskriptorerstellung in einer ersten Variante des Ausführungsbeispiels mittels Gradienten erfolgt die Erstellung analog zu der an sich bekannten GLOH-Methode. Zunächst werden Gradientenorientierungen betrachtet. Da aber
20 ein Rauschen in den Messwerten einen starken Einfluss auf die Gradienten aufweist, erfolgt zunächst eine Glättung der Messwerte durch Anbinden eines Gauss-Filters. Dieses Vorgehen ist an sich bekannt. Durch die Faltung der Messdaten mit der Ableitung des Gauss-Filters in x- sowie in y-Richtung werden die Messdaten geglättet und gleichzeitig die Gradienten in x- und y- Richtung
25 ermittelt. Hieraus wird die Orientierung und Amplitude des Gradientenvektors für die gewünschte Position (x, y) ermittelt. Die Orientierung im zweidimensionalen Raum kann mit den Werten $[0, 2\pi]$ dargestellt werden.

In Verfahrensschritt D1 des Ausführungsbeispiels wird somit für jeden Schlüsselpunkt zunächst eine Prüfregion definiert. Diese wird in dem vorliegenden
30 Beispiel als Kreis um den Schlüsselpunkt mit einem Radius von 40 Pixeln (Messpunkten) definiert. Anschließend wird für jeden Messpunkt, welcher innerhalb der Prüfregion liegt, wie zuvor beschrieben die Gradientenorientierung und die Gradientenamplitude in einem Verfahrensschritt B1.1 ermittelt.

Zur Ausrichtung der Gradientenorientierungen entsprechend der Struktur um den Schlüsselpunkt wird zunächst die Orientierung der Struktur um den Schlüsselpunkt wie folgt bestimmt:

5 Die zuvor ermittelten Gradientenorientierungen innerhalb der Prüfregion werden in einem Orientierungshistogramm abgebildet, welches beispielsweise 36 Bins aufweist, das heißt 36 einzelne Kategorien die jeweils einen gleichmäßigen Orientierungsbereich abdecken. Das Ergebnis solch einer Einteilung ist in Figur 3a dargestellt. Hierbei kann der Fall auftreten, dass zwischen zwei Bins mit maxi-
10 malen Wert ein Bin mit niedrigem Wert liegt. Vorzugsweise wird eine solche Orientierung mit niedrigem Wert nicht zur Berechnung der Keypointorientierung mit einbezogen. Es ist daher vorteilhaft, das Histogramm zu glätten mit an sich bekannten Methoden. Das Ergebnis solch einer Glättung ist in Figur 3b dargestellt.

15 Um nun ein rotationsinvariantes Ergebnis, das heißt einen rotationsinvarianten Deskriptor für den Schlüsselpunkt zu erhalten, wird die Prüfregion um die zuvor bestimmte Orientierung am Schlüsselpunkt gedreht. Je nach Art der Deskriptorerstellung kann dies indirekt durch eine Korrektur der Gradientenorientierung und des Deskriptors entsprechend der Schlüsselpunktorientierung erfolgen.

20

Hiervon ausgehend wird für den Schlüsselpunkt-Deskriptor für den Schlüsselpunkt, welcher insbesondere abhängig von den Messdaten der Messpunkte innerhalb der Prüfregion bestimmt wurde.

25 Es wurden bisher somit die Schlüsselpunkte bestimmt, deren Orientierung berechnet und die Prüfregion entsprechend der Schlüsselpunktorientierung gedreht. Dieses Vorgehen ist an sich bekannt und beispielsweise in (Lowe, D.G., *Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision*, 2004: p. 91-110.) beschrieben.

30

Anschließend wird nun für jeden Schlüsselpunkt ein Deskriptor erstellt:

Dies kann analog zu der an sich bekannten GLOH-Methode erfolgen.

35

Eine einfache Möglichkeit der Deskriptorerstellung ist zum Beispiel die Erstellung eines Merkmalsvektors anhand der Gradientenorientierungen. Jeder Orien-

tierung oder Orientierungsbereich stellt ein Merkmal dar. Die Ausprägung des Merkmals einer bestimmten Orientierung ergibt sich aus der Summe der Gradientenamplituden mit dieser Orientierung.

5 Ergänzend zu dieser vorgenannten Erstellung des Deskriptors sind auch an sich bekannte Sampling-Verfahren anwendbar. Hierbei ist insbesondere das polare Sampling vorteilhaft, da die zu untersuchenden Risse typischerweise höhere Gradientenamplituden nahe des Risszentrums gegenüber den weiter entfernt liegenden Messpunkten aufweisen. Daher ist ein polares Sampling, dessen
10 Zentrum mit dem Schlüsselpunkt übereinstimmt, insbesondere vorteilhaft. Ein weiterer Vorteil ist, dass die oben erwähnte Drehung der Prüfregion entsprechend der Schlüsselpunktorientierung in polaren Koordinaten einfach umgesetzt werden kann.

15 Eine zusätzliche Verbesserung der Deskriptorerstellung erfolgt analog zu GLOH durch die Einteilung der Prüfregion in unterschiedliche Gebiete. Für jedes Teilgebiet wird ein Merkmalsvektor erstellt. Der Deskriptor ergibt sich dann aus einer Kombination der Merkmalsvektoren der verschiedenen Teilgebiete. Hieraus ergeben sich zusätzliche Informationen über die Struktur der Region, welche
20 von großem Vorteil für die Unterscheidung von Rissen und anderen Strukturen sind.

Untersuchungen des Anmelders haben ergeben, dass es vorteilhaft ist, in einer Variante zu der zuvor beschriebenen Verwendung der Gradienten zur Erstellung
25 der Deskriptoren die Filterantworten des zuvor beschriebenen Balkenfilters zur Berechnung der Deskriptoren zu verwenden. Hierzu wird anstelle der Gradientenorientierung die Orientierung des Balkenfilters gewählt, welches die maximale Filterantwort erzeugt.

30 Analog zu dem zuvor beschriebenen Vorgehen wird anstelle der Gradientenamplitude die entsprechende Intensität der maximalen Filterantwort gewählt. Der Unterschied dieser Variante zu der Variante bei Verwendung von Gradienten zeigt sich insbesondere in der Amplitudenmatrix: Während bei der Variaten unter Verwendung der Gradienten die Ränder der Risse maximale Werte aufwei-
35 sen, weist bei der Variante mit Verwendung der Filterantwort des Balkenfilters der Riss selber den maximalen Wert auf.

Grundsätzlich unterscheidet sich diese Variante der Deskriptorenbildung von der zuvor beschriebenen lediglich in der Wahl der Eingabe: Statt der Gradientenwerte der den Schlüsselpunkt umgebenden Prüfregion wird nun die Filterantwort des anisotropen Balkenfilters verwendet. Der restliche Ablauf erfolgt analog.

Unabhängig von der gewählten Variante wird abschließend in einem Verfahrensschritt D2 ein Lernalgorithmus mittels der erstellten Deskriptoren und der in Verfahrensschritt B bereitgestellten Rissdaten trainiert.

Untersuchungen des Anmelders haben ergeben, dass insbesondere eine Support-Vektor-Maschine zuverlässig einsetzbar ist.

Ergebnis dieses Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Verfahrens ist somit ein mittels Trainieren der Support-Vektor-Maschine erstelltes Vorhersagemodell.

In einem zweiten Ausführungsbeispiel wird nun ein Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Rissdetektion beschrieben.

Hierzu wird das zuvor beschriebene Vorhersagemodell verwendet.

In einem Verfahrensschritt A erfolgt ein Bereitstellen einer Halbleiterstruktur und in einem Verfahrensschritt B wird das zuvor beschriebene Vorhersagemodell bereitgestellt.

Anschließend erfolgt im Verfahrensschritt C eine orts aufgelöste Vermessung der Halbleiterstruktur. Diese erfolgt vorzugsweise analog zu der bei der ersten Ausführungsform beschriebenen orts aufgelösten Photolumineszenzmessung gemäß dem dort beschriebenen Verfahrensschritt C.

Im Ergebnis liegen somit für eine Vielzahl von örtlichen Messpunkten der Halbleiterstruktur Messdaten vor, welche mit der jeweils örtlichen Intensität der erzeugten Photolumineszenzstrahlung korrelieren.

In einem Verfahrensschritt D erfolgt die Bestimmung für mindestens einen örtlichen Prüfpunkt, ob sich an diesem Prüfpunkt ein Riss befindet.

5 Auch hierbei ist es grundsätzlich möglich, beispielsweise für jeden der Messpunkte eine solche Bestimmung durchzuführen.

Besonders vorteilhaft ist es jedoch, wie zuvor beschrieben auch bei der Rissdetektion zunächst Schlüsselpunkte zu bestimmen und die vorgenannte Prüfung lediglich für die ermittelten Schlüsselpunkte durchzuführen. Die Bestimmung der
10 Schlüsselpunkte kann dabei wie zu dem ersten Ausführungsbeispiel beschrieben erfolgen.

Für jeden Prüfpunkt erfolgt in einem Verfahrensschritt D1 das Erstellen eines Deskriptors, in dem für den Prüfpunkt eine Prüfregion vorgegeben oder ermittelt
15 wird. Diese Deskriptorerstellung erfolgt gleich wie zuvor bei dem ersten Ausführungsbeispiel beschrieben.

Im Unterschied zum ersten Ausführungsbeispiel erfolgt bei der Rissdetektion in einem Verfahrensschritt D2 ein Anwenden des Vorhersagemodells derart, dass
20 mittels des Deskriptors und des Vorhersagemodells bestimmt wird, ob sich an dem Prüfpunkt ein Riss befindet. Mittels des Vorhersagemodells ist somit eine Klassifizierung möglich, in dem entsprechende Schlüsselpunkte als einem Riss zugehörige oder nicht einem Riss zugehörige Punkte klassifiziert werden.

25 In dem hier beschriebenen zweiten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens erfolgt anschließend eine Rissrekonstruktion für die in Verfahrensschritt D als einem Riss zugehörig klassifizierten Schlüsselpunkte:

Die Rissrekonstruktion erfolgt mit der an sich bekannten Methode der Hysterese:
30 Beginnend bei dem Schlüsselpunkt, welcher typischerweise das Risszentrum ist, wird Messpunkt für Messpunkt der Riss in seiner ursprünglichen Form rekonstruiert. Der Rekonstruktion liegt die Annahme zugrunde, dass sich der Riss sternförmig ausbreitet und hierauf basierend wird die Ähnlichkeit der Rissumgebung mit einem sternförmigen Muster ermittelt. Ein Messpunkt in der Umgebung
35 des Risszentrums gehört somit mit hoher Wahrscheinlichkeit zu dem Riss, falls dieser Messpunkt auf einer Balkenstruktur liegt, welche sich ausgehend vom

Risszentrum ausbreitet. Es ist daher vorteilhaft, zur Rekonstruktion für jeden Ortspunkt die Orientierung und Filterantwort eines Balkenfilters wie zuvor beschrieben zu berechnen.

- 5 Die Orientierungen der Messpunkte in der Umgebung des Risszentrums werden mit den Orientierungen eines Sternmusters verglichen. Hierbei kann vorzugsweise als Ähnlichkeitsmaß der Kosinus zwischen den Winkeldifferenzen berechnet und mit der Amplitude der jeweiligen Filterantwort gewichtet werden.
- 10 Vorzugsweise wird zusätzlich das sich ergebende Bild, welches durch die Hysteresis entsteht, auf seine morphologischen Eigenschaften überprüft. Insbesondere ist es vorteilhaft, die Fläche, die Orientierung sowie die Länge des Risses für eine Korrelation mit der Stabilität der Wafer heranzuziehen.
- 15 Das Ergebnis einer solchen Rissrekonstruktion ist in Figur 4 dargestellt.

Ansprüche

1. Verfahren zur Bereitstellung eines Vorhersagemodells für eine Rissdetektion
an einer Halbleiterstruktur, welche Halbleiterstruktur eine photovoltaische
Solarzelle, eine Vorstufe einer photovoltaischen Solarzelle im Herstellungs-
prozess, insbesondere Halbleitermaterial zur Herstellung einer Solarzelle,
ist,

folgende Verfahrensschritte umfassend:

- A. Bereitstellen einer Referenz-Halbleiterstruktur, welche Referenz-Halbleiterstruktur mindestens einen Riss aufweist;
- B. Bereitstellen von Rissdaten zu dem mindestens einen Riss, welche Rissdaten geometrische Ortsdaten hinsichtlich der Lage des Risses auf der Referenz-Halbleiterstruktur umfassen;
- C. Ortsaufgelöste Vermessung der Referenz-Halbleiterstruktur durch ortsaufgelöste Messung für eine Mehrzahl von örtlichen Messpunkten von in der Halbleiterstruktur erzeugter Photolumineszenzstrahlung und/oder ortsaufgelöster Messung der IR-Absorption der Halbleiterstruktur und
- D. Erstellen eines Vorhersagemodells mittels Trainieren eines Lernalgorithmus anhand der in Verfahrensschritt C ermittelten ortsaufgelösten Messdaten und der in Verfahrensschritt B bereitgestellten Rissdaten, wobei das Trainieren des Lernalgorithmus folgende Verfahrensschritte umfasst:
 - D1 Erstellen mindestens eines Deskriptors für mindestens einen örtlichen Deskriptorpunkt, indem für den Deskriptorpunkt eine Prüfregion vorgegeben oder ermittelt wird und anhand der Messdaten innerhalb der Prüfregion der Deskriptor erstellt wird, welcher Deskriptor ein Merkmalsvektor und/oder eine Merkmalsverteilung und/oder ein Merkmalshistogramm ist und
 - D2 Trainieren des Lernalgorithmus mittels des Deskriptors und der Rissdaten.

2. Verfahren zur Rissdetektion an einer Halbleiterstruktur, welche Halbleiterstruktur eine photovoltaische Solarzelle, eine Vorstufe einer photovoltaischen Solarzelle im Herstellungsprozess, insbesondere Halbleitermaterial zur Herstellung einer Solarzelle, ist,

5 folgende Verfahrensschritte umfassend:

- A. Bereitstellen der Halbleiterstruktur;
- B. Bereitstellen eines Vorhersagemodells, welches Vorhersagemodell durch Trainieren eines Lernalgorithmus erstellt wurde, vorzugsweise gemäß Anspruch 1;
- 10 C. Ortsaufgelöste Vermessung der Halbleiterstruktur durch ortsaufgelöste Messung für eine Mehrzahl von örtlichen Messpunkten von in der Halbleiterstruktur erzeugter Photolumineszenzstrahlung und/oder ortsaufgelöster Messung der IR-Absorption der Halbleiterstruktur;
- 15 D. Bestimmung für mindestens einen örtlichen Prüfpunkt, ob sich an diesem Prüfpunkt ein Riss befindet, folgende Verfahrensschritte umfassend:
 - D1 Erstellen mindestens eines Deskriptors für den Prüfpunkt, indem für den Prüfpunkt eine Prüfregion vorgegeben oder
 - 20 ermittelt wird und anhand der Messdaten innerhalb der Prüfregion der Deskriptor erstellt wird, welcher Deskriptor ein Merkmalsvektor und/oder eine Merkmalsverteilung und/oder ein Merkmalshistogramm ist und
 - D2 Bestimmung mittels des Deskriptors und des Vorhersagemodells, ob sich an dem Prüfpunkt ein Riss befindet.
- 25

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass bei Detektion eines Risses gemäß Verfahrensschritt D in einem Verfahrensschritt E eine Rissrekonstruktion erfolgt, indem die geometrischen Daten der Rissausprägung ermittelt werden.
- 30

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass in Verfahrensschritt E für eine örtliche Rekonstruktionsregion um den Prüfpunkt für jeden Messpunkt innerhalb der Rekonstruktionsregion eine
- 35

Orientierung ermittelt wird und mittels eines Ähnlichkeitsvergleiches mit einem sternförmigen Muster durch Mustererkennung die dem Riss zugehörigen Messpunkte ermittelt werden.

- 5 5. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass in Verfahrensschritt D1 gemäß Anspruch 1 der mindestens eine Deskriptorpunkt und/oder in Verfahren gemäß Anspruch 2 der mindestens ein Prüfpunkt mittels eines Verfahrens zur Auffindung von Schlüsselpunkten be-
10 stimmt wird, vorzugsweise gemäß mindestens einem der Verfahren SIFT, GLOH und/oder SURF.
6. Verfahren nach Anspruch 5,
dadurch gekennzeichnet,
15 dass das Bestimmen des mindestens einen Schlüsselpunktes mittels eines orientierungssteuerbaren Filters erfolgt, vorzugsweise mittels eines Balkenfilters insbesondere unter Verwendung einer Ableitung, bevorzugt der zweiten Ableitung, eines Gaussfilters.
- 20 7. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Deskriptor in Verfahrensschritt D1 gemäß Anspruch 1 und/oder Anspruch 2 ermittelt wird gemäß mindestens einem der Verfahren SIFT, GLOH, HOG, LESH und/oder SURF und/oder
25 dass zur Erstellung des Deskriptors die maximale Filterantwort und Orientierung eines skalierbaren und rotierbaren Filters, vorzugsweise eines Balkenfilters verwendet wird.
8. Verfahren nach Anspruch 7,
30 dadurch gekennzeichnet,
dass der Deskriptor folgende Verfahrensschritte umfassend erstellt wird:
D1.1 Bestimmung einer Amplitude und einer Orientierung für jeden Orts-
punkt der Prüfregion, vorzugsweise durch ermitteln einer Kenngröße
für jeden Messpunkt der Prüfregion, welche Kenngröße weiter bevor-
35 zugt der Gradient des Messwertes für den jeweiligen Messpunkt oder

die maximale Filterantwort und Orientierung eines steuerbaren Filters für den jeweiligen Messpunkt ist;

D1.2 Erstellung eines Merkmalhistogramms für zumindest ausgewählte Schlüsselpunkte der Prüfregion.

5

9. Verfahren nach Anspruch 8,
dadurch gekennzeichnet,
dass zusätzlich eine Risshauptorientierung ermittelt wird und
dass eine Korrektur des Merkmalhistogramms anhand der Risshauptorientie-
10 rung erfolgt, um ein rotationsinvariantes Merkmalhistogramm zu erhalten.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 9,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Risshauptorientierung zwischen Verfahrensschritt D1.1 und D1.2
15 ermittelt wird und
dass in Verfahrensschritt D1.2 das Merkmalhistogramm durch Abtasten der
Messpunkte innerhalb der Prüfregion mittels eines Abtastalgorithmus gemäß
GLOH und/oder SIFT und/oder einer Variante von GLOH oder SIFT erfolgt.

20 11. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Prüfregion in Verfahrensschritt D1 gemäß Anspruch 1 und/oder ge-
mäß Anspruch 2 folgende Verfahrensschritte umfassend bestimmt wird:

25 - Bestimmung mindestens eines örtlichen Schlüsselpunktes gemäß ei-
nem der Ansprüche 5 bis 6,

30 - Bestimmung der Messpunkte innerhalb der Prüfregion anhand einer
vorgegebenen geometrischen Ausdehnung der Prüfregion um den
Schlüsselpunkt, vorzugsweise einer rechteckigen, elliptischen oder
kreisförmigen Prüfregion, deren Mittelpunkt der Schlüsselpunkt ist.

12. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass die geometrische Lage von Korngrenzen als Korngrenzendaten inner-
35 halb der Halbleiterstruktur vorgegeben und/oder mittels eines orts aufgelös-

ten Messverfahrens ermittelt werden und

dass eine Gewichtung abhängig von den Korngrenzendaten erfolgt, indem

- bei Bestimmung eines Schlüsselpunktes gemäß Anspruch 5 solche Ortspunkte, welche auf einer Korngrenze liegen, nicht als Schlüsselpunkt gewählt werden oder bei Bestimmung des Schlüsselpunktes mit einer gegenüber den übrigen Ortspunkten geringeren Gewichtung versehen werden und/oder
- bei Erstellung eines Deskriptors in Verfahrensschritt D gemäß Anspruch 1 und/oder 2 solche Ortspunkte, welche auf einer Korngrenze liegen nicht oder mit einer gegenüber den übrigen Ortspunkten geringeren Gewichtung berücksichtigt werden und/oder
- bei Rekonstruktion des Risses gemäß Anspruch 3 solche Ortspunkte, welche auf einer Korngrenze liegen, nicht oder mit einer gegenüber den übrigen Ortspunkten geringeren Gewichtung berücksichtigt werden.

13. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,

dass der Lernalgorithmus ein Neuronales Netz oder ein Bayes-Klassifikator oder ein auf einer Kernel-Maschine beruhenden Lernalgorithmus, insbesondere bevorzugt ein Support-Vektor-Maschine-Algorithmus ist.

14. Vorrichtung zur Rissdetektion an einer Halbleiterstruktur, welche Halbleiterstruktur eine photovoltaische Solarzelle oder eine Vorstufe einer photovoltaischen Solarzelle im Herstellungsprozess, einschließlich des Halbleiter-Rohmaterials, ist,

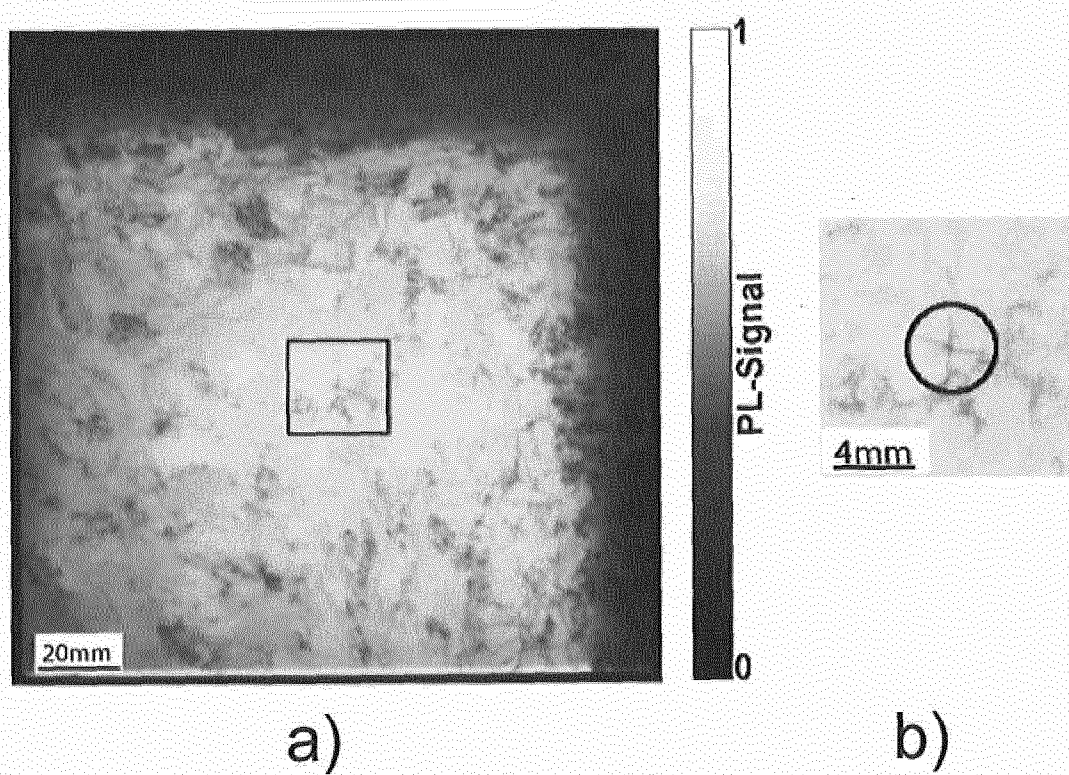
umfassend eine Messeinheit zur orts aufgelöster Messung von in der Halbleiterstruktur erzeugter Lumineszenzstrahlung und/oder orts aufgelöster Messung der IR-Absorption der Halbleiterstruktur und eine Auswerteeinheit zur Rissdetektion anhand von mittels der Messeinheit ermittelter orts aufgelöster Messdaten,

dadurch gekennzeichnet,

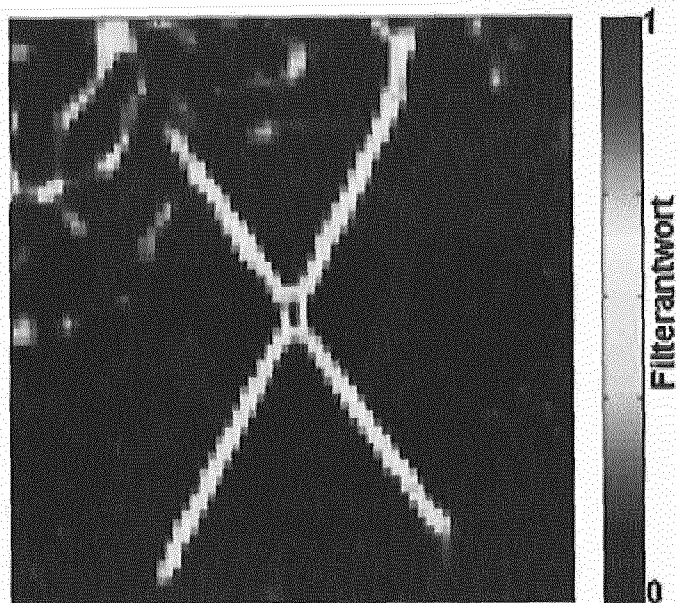
dadurch gekennzeichnet,

dass die Auswerteeinheit ausgebildet ist zur Rissdetektion gemäß einem der Ansprüche 2 bis 13.

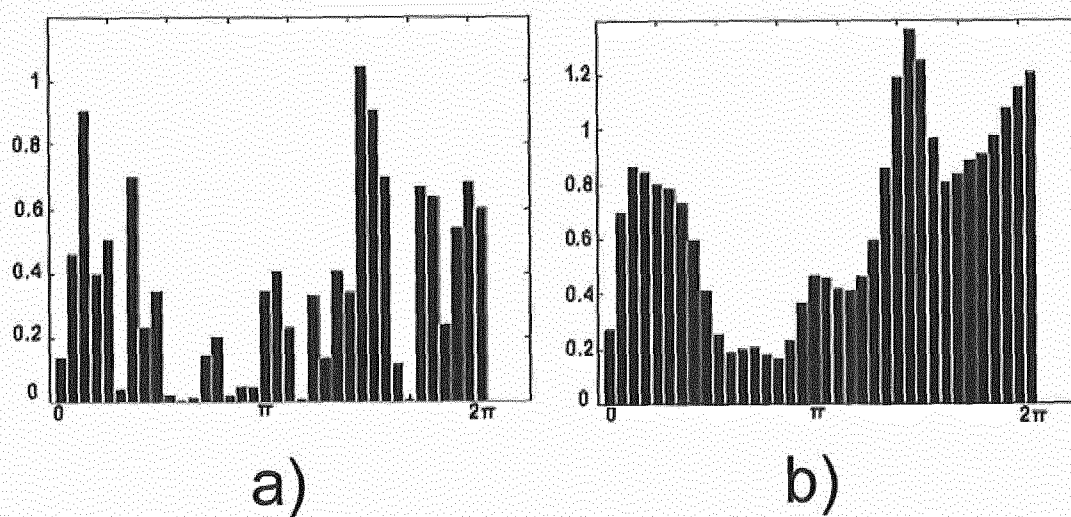
Figur 1



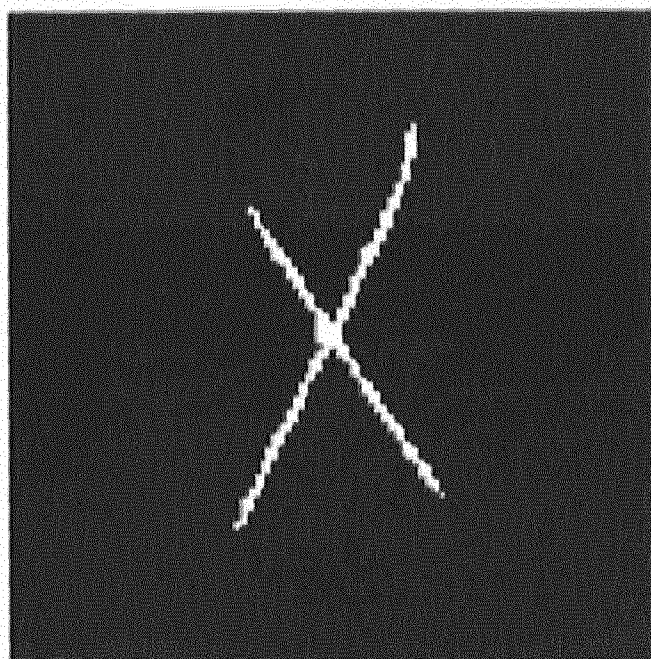
Figur 2



Figur 3



Figur 4



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2012/061496

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. H01L21/66 G01N21/95 G06T7/00
ADD.

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

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01L G01N G06T

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

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

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	LI BIN ET AL: "Automatic inspection of surface crack in solar cell images", CONTROL AND DECISION CONFERENCE (CCDC), 2011 CHINESE, IEEE, 23 May 2011 (2011-05-23), pages 993-998, XP031909684, DOI: 10.1109/CCDC.2011.5968329 ISBN: 978-1-4244-8737-0 abstract Abschitte II. "Automatic Inspection Method" und III. "Experiments"; figures 3,4 ----- -/-	1,2,12, 14



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

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

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

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

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

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

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

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

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

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

29 August 2012

Date of mailing of the international search report

06/09/2012

Name and mailing address of the ISA/

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

Authorized officer

Seck, Martin

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2012/061496

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	DEMANT M ET AL: "Analysis of luminescence images applying pattern recognition techniques", EU PVSEC PROCEEDINGS : 25TH EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION / 5TH WORLD CONFERENCE ON PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION, 6-10 SEPTEMBER 2010, VALENCIA, SPAIN, WIP-RENEWABLE ENERGIES, DE, 1 September 2010 (2010-09-01), pages 1078-1082, XP009162280, ISBN: 978-3-936338-26-3 Abschnitte 2.3 "Crack Detection", 3 "Definition of a Standard Feature Set", 3 "Experimental" und 3.2 "Evaluation Setup"; figure 4 -----	1-14

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. H01L21/66 G01N21/95 G06T7/00
ADD.

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

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
H01L G01N G06T

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

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

EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	LI BIN ET AL: "Automatic inspection of surface crack in solar cell images", CONTROL AND DECISION CONFERENCE (CCDC), 2011 CHINESE, IEEE, 23. Mai 2011 (2011-05-23), Seiten 993-998, XP031909684, DOI: 10.1109/CCDC.2011.5968329 ISBN: 978-1-4244-8737-0 Zusammenfassung Abschitte II. "Automatic Inspection Method" und III. "Experiments"; Abbildungen 3,4 ----- -/-	1,2,12, 14



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

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

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

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

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

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

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

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

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

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

29. August 2012

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

06/09/2012

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

Seck, Martin

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	DEMANT M ET AL: "Analysis of luminescence images applying pattern recognition techniques", EU PVSEC PROCEEDINGS : 25TH EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION / 5TH WORLD CONFERENCE ON PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION, 6-10 SEPTEMBER 2010, VALENCIA, SPAIN, WIP-RENEWABLE ENERGIES, DE, 1. September 2010 (2010-09-01), Seiten 1078-1082, XP009162280, ISBN: 978-3-936338-26-3 Abschnitte 2.3 "Crack Detection", 3 "Definition of a Standard Feature Set", 3 "Experimental" und 3.2 "Evaluation Setup"; Abbildung 4 -----	1-14