



(10) DE 11 2017 005 308 T5 2019.08.08

(12)

## Veröffentlichung

der internationalen Anmeldung mit der  
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2018/075814**  
in der deutschen Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2  
IntPatÜG)  
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2017 005 308.0**  
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2017/057467**  
(86) PCT-Anmeldetag: **19.10.2017**  
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **26.04.2018**  
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung  
in deutscher Übersetzung: **08.08.2019**

(51) Int Cl.: **G05B 19/418 (2006.01)**  
**G05B 23/02 (2006.01)**

(30) Unionspriorität:  
**15/299,616** 21.10.2016 US

(72) Erfinder:  
**Biagini, Karen, Watsonville, CA, US; Mantiply,  
Bryant, Mountain View, CA, US; Jayantha Rao,  
Ravichander, Murugeshpalya, Bangalore, IN;  
Taan, Gary, San Jose, CA, US**

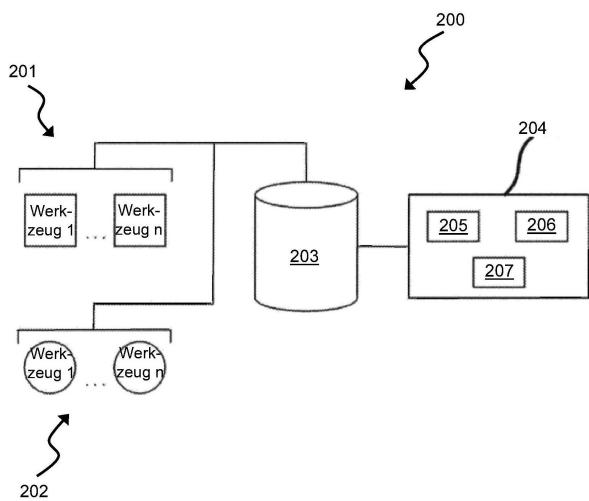
(71) Anmelder:  
**KLA-Tencor Corporation, Milpitas, Calif., US**

(74) Vertreter:  
**Reichert & Lindner Partnerschaft Patentanwälte,  
93047 Regensburg, DE**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Quantifizieren und Reduzieren der Gesamtmessunsicherheit**

(57) Zusammenfassung: Eine Prozesssteuerungstechnik verwendet Produktionsdaten aus mehreren Fertigungswerkzeugen und mehreren Inspektions- oder Metrologiewerkzeugen. Die Gesamtmeßunsicherheit (TMU) kann aus den Produktionsdaten berechnet werden. Dazu gehören Messungen von einem oder mehreren mit den Fertigungswerkzeugen hergestellten Bauelementen. Fertigungsschritte können anhand der TMU in eine Rangfolge gebracht oder auf andere Weise verglichen werden. Alle Produktionsmodi und -rezep- te können anhand von Produktionsdaten kontinuierlich über- wacht werden.



**Beschreibung**

## Technisches Gebiet

**[0001]** Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf Prozesssteuerung bei der Herstellung.

## Hintergrund der Erfindung

**[0002]** Die Qualität von Produkten auf dem neuesten Stand der Technik wird immer wichtiger, da diese Produkte ein grundlegender Bestandteil unserer modernen High-Tech-Wirtschaft werden. Die Hersteller konzentrieren sich weiterhin auf Qualitätskontrolle und Reproduzierbarkeit, um den Anforderungen der High-Tech-Wirtschaft gerecht zu werden. Prozesssteuerung wird verwendet, um die beständigen Produkteigenschaften in einem Fertigungsprozess zu erzeugen. In Produktionslinien, in denen eine komplizierte oder anderweitig informationssensitive Fertigung durchgeführt wird, ist eine Qualitätskontrolle unerlässlich.

**[0003]** Eine mangelhafte Qualitätskontrolle kann hergestellte Produkte drastisch beeinflussen. Unsachgemäße oder mangelhafte Prozesssteuerung kann dazu führen, dass ein Produkt einen geringeren Wert hat oder für einen Benutzer sogar unbrauchbar ist. Hersteller sind durch eine unzureichende Prozesssteuerung negativ betroffen, da ein Hersteller möglicherweise Herstellungskosten für ein unbrauchbares Produkt übernimmt, die Chance verliert, mit einem akzeptablen Produkt Gewinn zu erzielen, oder Einnahmen aufgrund eines reduzierten Verkaufspreises eines nicht kompatiblen Produkts einbüßt. Daher kann die Prozesssteuerung beeinflussen, ob das Geschäft des Herstellers überlebt oder ausfällt.

**[0004]** Fertigungsumgebungen erfordern Messsysteme, die eine geringe Gesamtmeßunsicherheit (TMU; im Englischen „overall total measurement uncertainty“) aufweisen. Die Meßunsicherheit kennzeichnet die Streuung von Werten, die einer Meßgröße zugeordnet werden. Die TMU kann von der Genauigkeit des zur Meßung verwendeten Werkzeugs (Tool, Maschine) sowie von der Werkzeug-zu-Werkzeug-Übereinstimmung (im Englischen „tool-to-tool matching“) der Flotte möglicher Meßwerkzeuge (Meßmaschinen) abhängen.

**[0005]** In komplizierten Fertigungsumgebungen sind viele Variablen gleichzeitig von Belang. Während hierauf eine Halbleiterumgebung Bezug genommen wird, gelten die Prinzipien allgemein für jede Fertigungsumgebung. In einer Halbleiterfertigungsumgebung sind beispielsweise Variablen wie das Prozessrezept, das Meßwerkzeurezept, der Gesamtprozesszustand, der Meßwerkzeugzustand und andere Parameter von Belang. Das Bereitstellen einer Technik zum Überwachen der Meßabweichung in einer Fertigungsanlage, um sicherzustellen, dass sich die Abweichung im Laufe der Zeit nicht verschlechtert, kann für einen Hersteller wertvoll sein. Wenn eine Verschiebung erkannt wird, kann die erkannte Verschiebung schnell angesprochen werden.

**[0006]** Es gibt mehrere bekannte Verfahren, um die Probleme einer übermäßigen Meßabweichung in einer Halbleiterherstellungsumgebung zu adressieren. Halbleiterhersteller und Werkzeug-/Maschinenhersteller sind sich jedoch in Bezug auf optimale Verfahren für die Überwachung von Meßsystemen typischerweise nicht einig. Halbleiterhersteller können Überwachungsverfahren verwenden, die die Fertigungsanforderungen für ein Meßsystem erfüllen, und in der Regel den Zustand eines Meßsystems unter Verwendung von natürlich vorkommenden Produktionsdaten messen. Beispielsweise können alle Produktionsdaten bei der Herstellung verwendet werden. Produktionswaferdaten werden im Allgemeinen anstelle von Referenzwaferdaten verwendet. Übereinstimmende Ergebnisse können kontinuierlich gemessen werden. Die Techniken von Halbleiterhersteller können Boxplots, einfache Mittelwerte und Standardabweichungen von der Produktion, statistische Tests der Produktion (beispielsweise Varianzanalyse (ANOVA), ttest) oder statistische Tests bestimmter „goldener Wafer“ oder Referenzwafer (beispielsweise ANOVA, ttest) umfassen. Im Gegensatz dazu neigen Werkzeug-/Maschinenhersteller (die die vom Halbleiterhersteller verwendeten Geräte verkaufen und / oder warten) dazu, sich auf reine Experimente zu konzentrieren, um die Meßung von Prozessschwankungen zu trennen. Diese Experimente erzeugen möglicherweise keine steigenden alarmierenden Prozentsätze mit dem Produktionsvolumen. Der Prozentsatz der übereinstimmungsbezogenen Alarne erhöht sich möglicherweise nicht, wenn sich die Genauigkeit verbessert, und umgekehrt. Die Techniken von Werkzeug-/Maschinenherstellern können Studien zur Übereinstimmung (Matching) und eine tägliche Überwachung von Referenzwafers gegenüber Spezifikationen umfassen. Daher sind die Überwachungsverfahren von Halbleiterherstellern und Werkzeug-/Maschinenherstellern nicht aufeinander abgestimmt.

**[0007]** Daher werden verbesserte Techniken zur Prozesssteuerung benötigt.

## Kurze Beschreibung der Erfindung

**[0008]** In einer ersten Ausführungsform wird ein System bereitgestellt. Das System umfasst eine Schnittstelle und eine Prozesssteuereinheit für eine elektronische Kommunikation mit der Schnittstelle. Die Schnittstelle steht in elektronischer Kommunikation mit einer Vielzahl von Fertigungswerkzeugen und einer Vielzahl von Inspektions- oder Metrologiewerkzeugen (Inspektions- oder Messwerkzeugen). Die Prozesssteuereinheit ist konfiguriert zum: Empfangen von Produktionsdaten von der Vielzahl der Fertigungswerkzeuge und der Vielzahl der Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge; Durchführen einer Varianzkomponentenanalyse aus den Produktionsdaten; Berechnen einer Gesamtmessunsicherheit (TMU) aus den Produktionsdaten; und Vergleichen von Fertigungsschritten anhand der TMU. Die Produktionsdaten umfassen Messungen von einem oder mehreren Bauelementen, die unter Verwendung der Fertigungswerkzeuge hergestellt werden. Die Varianzkomponentenanalyse ist konfiguriert, um die Werkzeug-zu-Werkzeug-Standardabweichung und die Gesamtstandardabweichung zu schätzen. Die Prozesssteuereinheit umfasst eine elektronische Datenspeichereinheit, die zum Speichern einer Liste der Fertigungsschritte anhand der TMU konfiguriert ist. Das Bauelement kann ein Halbleiterwafer sein. Die Prozesssteuereinheit kann einen Prozessor und einen Kommunikationsport für eine elektronische Kommunikation mit dem Prozessor und die elektronische Datenspeichereinheit umfassen. Die Schnittstelle kann ein gesicherter Server sein.

**[0009]** Die Prozesssteuereinheit kann ferner konfiguriert sein, um eine TMU-Steuerungsgrenzwirkung (CLI) aus den Produktionsdaten zu berechnen und Fertigungsschritte anhand der TMU-CLI zu vergleichen.

**[0010]** Die Prozesssteuereinheit kann ferner konfiguriert sein, um mindestens eines der Fertigungswerkzeuge oder mindestens eines der Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge auf Basis des Vergleichs der Fertigungsschritte anzupassen.

**[0011]** Die Prozesssteuereinheit kann ferner konfiguriert sein zum: Empfangen von Messdaten für ein Testvehikel von einem der Fertigungswerkzeuge oder einem der Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge; Durchführen einer Varianzkomponentenanalyse aus den Messdaten; Berechnen der TMU für die Genauigkeit, der Gesamt-TMU, der TMU-CLI-Genauigkeit und der Gesamt-TMU-CLI; und Vergleichen der Ergebnisse für die Messdaten anhand der TMU oder TMU-CLI. Die Varianzkomponentenanalyse kann die Standardabweichung der Genauigkeit schätzen. Die Prozesssteuereinheit kann ferner konfiguriert sein, um das Fertigungswerkzeug oder das Inspektionswerkzeug basierend auf dem Vergleich der Ergebnisse für die Messdaten anzupassen.

**[0012]** Die Prozesssteuereinheit kann konfiguriert sein, um die Varianzkomponentenanalyse kontinuierlich durchzuführen, die TMU zu berechnen und die Fertigungsschritte zu vergleichen.

**[0013]** In einer zweiten Ausführungsform ist ein Verfahren bereitgestellt. Das Verfahren umfasst ein Empfangen von Produktionsdaten von einer Vielzahl von Fertigungswerkzeugen und einer Vielzahl von Inspektions- oder Metrologiewerkzeugen an einem Prozessor; Durchführen einer Varianzkomponentenanalyse aus den Produktionsdaten unter Verwendung des Prozessors; Berechnen einer Gesamtmessunsicherheit (TMU) aus den Produktionsdaten unter Verwendung des Prozessors; und Vergleichen von Fertigungsschritten anhand der TMU unter Verwendung des Prozessors. Die Produktionsdaten umfassen Messungen von einem oder mehreren Bauelementen, die unter Verwendung der Fertigungswerkzeuge hergestellt werden. Die Varianzkomponentenanalyse schätzt die Werkzeug-zu-Werkzeug-Standardabweichung und die Gesamtstandardabweichung. Das Bauelement kann ein Halbleiterwafer sein.

**[0014]** Das Verfahren kann ferner umfassen: Berechnen einer TMU-Steuerungsgrenzwirkung (CLI) aus den Produktionsdaten unter Verwendung des Prozessors; und Vergleichen von Fertigungsschritten anhand der TMU-CLI unter Verwendung des Prozessors.

**[0015]** Das Verfahren kann ferner ein Anpassen von mindestens einem der Fertigungswerkzeuge oder von mindestens einem der Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge auf Basis des Vergleichs der Fertigungsschritte umfassen.

**[0016]** Das Verfahren kann ferner umfassen: Empfangen von Messdaten für ein Testvehikel von einem der Fertigungswerkzeuge oder einem der Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge an dem Prozessor; Durchführen einer Varianzkomponentenanalyse aus den Messdaten unter Verwendung des Prozessors; Berechnen der TMU für die Genauigkeit, der Gesamt-TMU, der TMU-CLI-Genauigkeit und der Gesamt-TMU-CLI unter Verwendung des Prozessors; und Vergleichen der Ergebnisse für die Messdaten anhand der TMU oder TMU-CLI unter Verwendung des Prozessors. Die Varianzkomponentenanalyse schätzt die Standardabweichung der

Genauigkeit. Das Verfahren kann ferner ein Anpassen des Fertigungswerkzeugs oder des Inspektionswerkzeugs basierend auf dem Vergleich der Ergebnisse für die Messdaten umfassen.

**[0017]** Die Varianzkomponentenanalyse, das Berechnen der TMU und das Vergleichen der Fertigungsschritte kann kontinuierlich durchgeführt werden.

**[0018]** In einer dritten Ausführungsform wird ein nichtflüchtiges computerlesbares Speichermedium bereitgestellt. Das nichtflüchtige computerlesbare Speichermedium umfasst ein oder mehrere Programme zum Ausführen der folgenden Schritte auf einer oder mehreren Rechenvorrichtungen. Diese Schritte umfassen ein Durchführen einer Varianzkomponentenanalyse aus Produktionsdaten einer Vielzahl von Fertigungswerkzeugen und einer Vielzahl von Inspektions- oder Metrologiewerkzeugen; Berechnen einer Gesamtmessunsicherheit (TMU) aus den Produktionsdaten; und Vergleichen von Fertigungsschritten anhand der TMU. Die Produktionsdaten umfassen Messungen von einem oder mehreren Bauelementen, die unter Verwendung der Fertigungswerkzeuge hergestellt werden. Die Varianzkomponentenanalyse schätzt die Werkzeug-zu-Werkzeug-Standardabweichung und die Gesamtstandardabweichung.

**[0019]** Die Schritte können ferner ein Berechnen einer TMU-Steuerungsgrenzwirkung (CLI) aus den Produktionsdaten und ein Vergleichen von Fertigungsschritten anhand der TMU-CLI umfassen.

**[0020]** Die Schritte können ferner umfassen: Empfangen von Messdaten für ein Testvehikel von einem der Fertigungswerkzeuge oder einem der Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge; Durchführen einer Varianzkomponentenanalyse aus den Messdaten; Berechnen der TMU für die Genauigkeit, der Gesamt-TMU, der TMU-CLI-Genauigkeit und der Gesamt-TMU-CLI; und Vergleichen der Ergebnisse für die Messdaten anhand der TMU oder TMU-CLI. Die Varianzkomponentenanalyse kann die Standardabweichung der Genauigkeit schätzen.

**[0021]** Die Schritte können ferner ein Anpassen eines der Fertigungswerkzeuge oder Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge auf Basis des Vergleichs der Ergebnisse umfassen.

#### Figurenliste

**[0022]** Für ein vollständigeres Verständnis der Art und der Ziele der Offenbarung sollte auf die folgende detaillierte Beschreibung in Verbindung mit den beigefügten Zeichnungen Bezug genommen werden:

**Fig. 1** ist ein Flussdiagramm einer Ausführungsform eines Verfahrens gemäß der vorliegenden Offenbarung;

**Fig. 2** ist ein Blockdiagramm einer Ausführungsform der Systemintegration gemäß der vorliegenden Offenbarung;

**Fig. 3** stellt ein Beispiel einer Prozesssteuerung bei einer Halbleiterherstellung dar;

**Fig. 4** ist ein beispielhaftes Pareto von Prioritäten verschiedener Messschritte;

**Fig. 5** ist ein beispielhaftes Diagramm, das die TMU-Steuerungsgrenzwirkung zeigt; und

**Fig. 6 - Fig. 9** stellen ein Beispiel dar, das eine Ausführungsform gemäß der vorliegenden Offenbarung verwendet.

#### Detaillierte Beschreibung der Erfindung

**[0023]** Obwohl der beanspruchte Gegenstand in Bezug auf bestimmte Ausführungsformen beschrieben wird, liegen andere Ausführungsformen, einschließlich Ausführungsformen, die nicht alle hierin dargelegten Vorteile und Merkmale bereitstellen, auch im Umfang dieser Offenbarung. Es können verschiedene strukturelle, logische, Prozessschritt- und elektronische Änderungen vorgenommen werden, ohne vom Umfang der Offenbarung abzuweichen. Dementsprechend wird der Umfang der Offenbarung nur durch Bezugnahme auf die beigefügten Ansprüche definiert.

**[0024]** Jeder der Schritte des Verfahrens kann wie hierin weiter beschrieben durchgeführt werden. Die Verfahren können auch einen oder mehrere andere Schritte umfassen, die von der hierin beschriebenen Prozesssteuereinheit und / oder den hierin beschriebenen Computersubsystemen oder -systemen durchgeführt werden können. Die Schritte werden von einem oder mehreren Computersystemen ausgeführt, die gemäß einer

der hierin beschriebenen Ausführungsformen konfiguriert sein können. Zusätzlich können die oben beschriebenen Verfahren durch eine der hierin beschriebenen Ausführungsformen des Systems durchgeführt werden.

**[0025]** Die hierin offenbarten Ausführungsformen sind in Bezug auf die Halbleiterherstellung offenbart. Die hierin offenbarten Techniken können jedoch auch auf andere Herstellungs-Settings angewendet werden, einschließlich solcher für Elektronik, Kraftfahrzeuge, Chemikalien, Pharmazeutika, Fluggeräte oder biomedizinische Geräte.

**[0026]** Ein Beispiel ist in **Fig. 3** gegeben. Obwohl sich das Beispiel von **Fig. 3** auf die Halbleiterherstellung bezieht, kann es auf andere komplexe und / oder anspruchsvolle Fertigungsumgebungen anwendbar sein. In **Fig. 3** wünscht der Halbleiterhersteller ein Messwerkzeug mit nahezu perfekten Standards. Das beste verfügbare Werkzeug (ein erstes Messwerkzeug) wird installiert. Ein zweites Messwerkzeug wird später installiert. Der Halbleiterhersteller wünscht, dass das erste und das zweite Werkzeug in ähnlicher Weise performen, wie etwa in Bezug auf ähnliche Mess-Mittelwerte (das heißt Werkzeug-zu-Werkzeug-Übereinstimmung) und kleine durch ein Werkzeug selbst hervorgerufene Abweichungen (abgekürzt mit „im-Werkzeug-Abweichung“; das heißt Genauigkeit). Das zweite Messwerkzeug kann jedoch bezüglich der Mittelwerte eine Verschiebung aufweisen, was zu einer geringfügigen Vergrößerung der +/- 3 Sigma-Steuerungsgrenzbreite für das Fertigungswerkzeug im Herstellungsprozess (mehrere Werkzeuge, Feld „A“) oder zu einer größeren Verschiebung in den Mittelwerten führt, was eine stärkere Vergrößerung der Steuerungsgrenzbreite verursacht (mehrere Werkzeuge, Feld „B“). Eine Vergrößerung der Steuerungsbreite verringert die Empfindlichkeit zum Detektieren einer echten Prozessverschiebung. Mit Hunderten von möglichen zu überwachenden Werkzeug- und Prozessschritt-kombinationen kann es schwierig sein, die Auswirkungen dieser Messsysteme zu quantifizieren und zu priorisieren.

**[0027]** Ein Halbleiterhersteller wünscht im Allgemeinen, dass alle Messsysteme über alle Messschritte hinweg einwandfrei sind. Die Verwendung von Gold- und Silber-Testwafern ist eine übliche Methode zur Überwachung von durch ein Werkzeug selbst hervorgerufenen Messabweichungen und von Werkzeug-zu-Werkzeug-Messabweichungen, erfordert jedoch sowohl Ressourcen als auch Zeit. Stattdessen wünscht der Halbleiterhersteller im Allgemeinen kontinuierliche Produktionsmessungen und schnellere Ergebnisse als ein Testwafer.

**[0028]** Die Verwendung von Produktionsmessungen ist jedoch problematisch. Ein Hersteller kann versuchen, einen Produktionsmonitor zu verwenden, bei dem ein Messschritt in dem Prozess eine Werkzeug-zu-Werkzeug-Abweichung aufweist, die größer als ein Bruchteil der Gesamtstandardabweichung der Prozessabweichung (Prozessvariation) ist, die auf einem Produktionssteuerungs-Chart zu sehen ist, beispielsweise 0,1 oder 0,3. Diese Technik kann bei Messschritten, die eine geringere Anzahl von Produktionseinheiten aufweisen als andere Messschritte, einen disproportionalen Alarm auslösen. Beispielsweise haben fünf Messschritte alle den gleichen Level an wahren Werkzeug-zu-Werkzeug-Messabweichungen zwischen den drei austauschbaren Messwerkzeugen, die für diese Anwendung verwendet werden, wie in Gleichung 1 dargestellt.

$$\frac{\sigma(\mu(\text{Werkzeug1}), \mu(\text{Werkzeug2}), \mu(\text{Werkzeug3}))}{\sigma(\text{Gesamtprozess})} \quad \text{Gleichung 1}$$

**[0029]** Der Nenner in Gleichung 1 ist die Standardabweichung des Gesamtprozesses auf dem Produktionssteuerungs-Chart, und der Zähler ist die wahre Langzeitstandardabweichung ( $\sigma$ ) der wahren Werkzeug-Mittelwerte ( $\mu(\text{Tool } i)$ ) für eine unendliche Stichprobengröße. Wenn die fünf Messschritte auf diese Weise ähnlich sind, sich jedoch in der Stichprobengröße unterscheiden, wobei einige Messschritte eine niedrigere und einige eine höhere Stichprobengröße aufweisen, dann tendieren die Messschritte, die eine geringe Anzahl von Prozessdurchläufen aufweisen, dazu als solche mit der größten scheinbaren Stichprobenmessabweichung „s“ der Werkzeugstichproben-Mittelwerte „m“ impliziert zu werden. Im Durchschnitt ist die Stichprobenvarianz der Werkzeug-Mittelwerte  $s^2(m(\text{Werkzeug 1}), m(\text{Werkzeug 2}), m(\text{Werkzeug 3}))$  selbst eine Zufallsvariable, die nicht nur von der wahren Abweichung der Werkzeug-Mittelwerte abhängt, sondern auch von der im-Werkzeug-Stichprobengröße  $N(\text{im Werkzeug})$ . „Im Werkzeug“ („durch ein Werkzeug selbst hervorgerufen“; „within-tool“ im Englischen) wird in den Gleichungen zur Verdeutlichung als „im Werkzeug“ bezeichnet. Im Falle einer konstanten Stichprobengröße „im Werkzeug“ kann der Erwartungswert der Stichprobenvarianz,  $s^2$ , wie folgt in Gleichung 2 ausgedrückt werden.

$$\begin{aligned}
 & \text{Erwartungswert} \left[ s^2(m(\text{Werkzeug 1}), m(\text{Werkzeug 2}), m(\text{Werkzeug 3})) \right] = \\
 & \sigma((\mu(\text{Werkzeug 1}), \mu(\text{Werkzeug 2}), \mu(\text{Werkzeug 3}))^2 + \sigma(\text{im Werkzeug})^2 / \\
 & N(\text{im Werkzeug}) \\
 & = \text{wahre Standardabweichung der Werkzeug - Mittelwerte + zufälliger Stichprobenfehler}
 \end{aligned}$$

Gleichung 2

**[0030]** Je größer die Stichprobengröße ist, desto kleiner ist der zufällige Stichprobenfehler. Umgekehrt gilt: je kleiner die Stichprobengröße ist, desto höher ist die erwartete Varianz der Mittelwerte, die nicht vom Messsystem selbst verursacht wird, sondern nur ein Nebeneffekt der zufälligen Stichprobenabweichung ist. Der hierin offenbarte TMU-Monitor ist für kleine Stichprobengrößen oder Stichprobengrößen großer Prozesse nicht pessimistisch.

**[0031]** Eine andere Technik, die manchmal bei Produktionsmessungen verwendet wird, ist eine statistische p-Wert-Technik. Im vorherigen Beispiel können die fünf Messschritte mit einem statistischen Test wie Varianzanalyse analysiert werden, um die Hypothese der Gleichheit der Produktions-Mittelwerte zwischen den drei Messwerkzeugen zu testen, wobei die Wahrscheinlichkeit (oder der „p-Wert“)  $<\alpha$  ist, wobei  $\alpha$  typischerweise 0,05 ist und als Beweis für eine systematische Wirkung über den Zufallshypothese hinaus verwendet werden kann. So kann bestimmt werden, ob erkennbare Differenzen zwischen den Werkzeugen bestehen, hilft jedoch nicht bei der Priorisierung, bei welchem Messschritt das größte Problem besteht. Die Rezept- / Messschritt-Kombinationen mit der größten Stichprobengröße weisen die kleinsten p-Werte auf, wobei alle anderen Faktoren konstant bleiben. Auf diese Rezept- / Messschritt-Kombinationen wird als potentielle Probleme hingewiesen, auch wenn diese Kombinationen nicht schlechter (und vielleicht sogar noch besser) als andere Messschritte bezüglich der Abweichung (Variation) des Messwerkzeugs sind. Der hierin offenbarte TMU-Monitor kann die Nachteile einer statistischen p-Wert-Technik vermeiden und kann ein robustes Ranking der Auswirkungen des Messsystems über Messschritte mit variierender Stichprobengröße liefern.

**[0032]** Eine Wiederholbarkeitsstudie zur ad-hoc-Messung kann mit einer oder mehreren im Test befindlichen Einheiten durchgeführt werden, wie beispielsweise einem Siliziumwafer oder einem anderen zu testenden Produkt. Eine Varianzanalyse zufälliger Effekte kann durchgeführt werden, um eine robuste Schätzung von Werkzeug-zu-Werkzeug-Abweichungen und von durch ein Werkzeug selbst hervorgerufenen Abweichungen (im-Werkzeug- Abweichungen) zu erhalten. Erwartungstreue Schätzungen der Variabilität von Werkzeug zu Werkzeug und Schätzungen von durch ein Werkzeug selbst hervorgerufener Variabilität können geschätzt werden. Ad-hoc-Experimente können jedoch im Materialumfang begrenzt sein. Da sich Material in einer natürlichen Produktionsumgebung ändert, kann sich auch die Empfindlichkeit der Messwerkzeuge für dieses Material ändern. Werkzeug-zu-Werkzeug-Messabweichungen könnten sich ohne deren Detektion verschlechtern, weil das für den Test verwendete Produkt nicht mehr anwendbar ist und / oder sich die Werkzeugbedingungen geändert haben. Ad-hoc-Experimente können im Allgemeinen keine geringfügigen Änderungen an Produkten und Werkzeugen im Laufe der Zeit widerspiegeln. Der hierin offenbarte TMU-Monitor kann die Nachteile von ad-hoc-Tests vermeiden, da Produktionsdaten verwendet werden.

**[0033]** Der hierin offenbarte TMU-Monitor ist ein robuster Indikator, der in Halbleiterfertigungsumgebungen oder in anderen Fertigungsumgebungen verwendet werden kann. Produktionsdaten werden verwendet, um die Abweichung von Werkzeugmessungen zu quantifizieren und um Werkzeugprobleme zu finden. Außerdem kann ein relativer Einfluss von Messungen bei einem Rezept-zu-Rezept-Vergleich mit einem Pareto analysiert werden.

**[0034]** Die Gesamtmessunsicherheit wird nachstehend entweder als %TMU (prozentuale TMU) oder einfach als TMU bezeichnet. Die absolute TMU und %TMU können wie folgt definiert werden.

$$\text{Absolute TMU} = \sigma(\text{Messung}) = \sqrt{\sigma(\text{Genauigkeit})^2 + \sigma(\text{Werkzeug zu Werkzeug})^2}$$

Gleichung 3

$$\%TMU = \frac{\sigma(Messung)}{\sigma(Gesamtprozess)} = \frac{\sqrt{\sigma(Genauigkeit)^2 + \sigma(Werkzeug\ zu\ Werkzeug)^2}}{\sigma(Gesamtprozess)}$$

Gleichung 4

**[0035]** In den obigen Gleichungen 3 und 4 ist  $\sigma$  die Standardabweichung.  $\sigma$  kann unter Verwendung einer Varianzkomponenten-Analysetechnik erzeugt werden.

**[0036]** Die %TMU kann von einem Hersteller gegenüber der absoluten TMU bevorzugt werden, da %TMU eine normalisierte Skala verwendet. Produktionsdaten können verwendet werden, um die Gesamtstandardabweichung der Messabweichung,  $\sigma(Gesamtprozess)$ , unter Verwendung der Standardabweichung in einem Produktionssteuerungs-Chart abzuschätzen. Messungen, die an Einheiten vorgenommen werden, die für die Produktion hergestellt werden, werden als „Produktionsdaten“ bezeichnet, anhand derer die Gesamtabweichung im Prozess geschätzt wird. Diese Produktionsdaten können physikalische Messungen (beispielsweise Dicke, Planarität), Qualitätsmessungen (beispielsweise ob Partikel oder Defekte vorhanden sind) oder andere während der Produktion vorgenommene Messungen sein. Die Gesamtstandardabweichung der Produktionsdaten,  $\sigma(Gesamtprozess)$ , kann sowohl die wahre Prozessabweichung als auch die Abweichung des Messsystems umfassen und wird in einer in einem Produktionssteuerungs-Chart sichtbaren Abweichung dargestellt. Produktionsdaten werden auch verwendet, um die Standardabweichung der wahren Abweichung zwischen den Messwerkzeug-Mittelwerten,  $\sigma(Werkzeug\ zu\ Werkzeug)$ , zu schätzen. Werkzeug-zu-Werkzeug wird in den Gleichungen zur Klarheit als „Werkzeug zu Werkzeug“ bezeichnet. Anstelle einer einfachen beobachteten Standardabweichung zwischen Werkzeug-Mittelwerten kann eine Varianzkomponenten-Analyse zufälliger Effekte verwendet werden, um eine erwartungstreue Schätzung der wahren Werkzeug-zu-Werkzeug-Standardabweichung bereitzustellen, wobei der erwartete zufällige Stichprobenfehler berücksichtigt wird. Somit sind die offenbarten Techniken robust gegenüber systematischen Fehlern bei großer und kleiner Stichprobengröße.

**[0037]** Ferner kann die Standardabweichung von Messungen eines einzelnen Messwerkzeugs an einer einzelnen Produktionseinheit über die Zeit, die als  $\sigma(Genauigkeit)$  bezeichnet wird, unter Verwendung eines Testvehikels, beispielsweise eines Referenzmonitors, geschätzt werden. Bei der Halbleiterherstellung kann ein Referenzmonitor ein Referenzwafer sein. In anderen Branchen kann der Referenzmonitor ein anderes Gerät zur Überwachung sein. Da das Ausführen von Testwafers relativ teuer sein kann und da  $\sigma(Genauigkeit)$  eine weniger einflussreiche Quelle für Abweichungen sein kann, kann die Schätzung von  $\sigma(Genauigkeit)$  auf eine kleine Stichprobe von Messschritten reduziert werden und die Schätzung von  $\sigma(Werkzeug\ zu\ Werkzeug)$  kann für alle Produktionsschritte durchgeführt werden. Ein Beispiel ist in den **Fig. 6** bis **Fig. 9** gegeben.

**[0038]** Die Formel für die absolute TMU in Gleichung 3 drückt die Gesamtmessungsabweichung in ursprünglichen Einheiten (beispielsweise A,  $\mu m$ , Defektzählungen, mm, und so weiter) aus oder kann ohne Einheiten (beispielsweise ein über Einheiten normierter Prozentsatz) sein, wie beispielsweise %TMU in Gleichung 4. Die Messung ohne Einheiten hat den Vorteil, dass sie Vergleiche über viele Schichten hinweg mit jeweils unterschiedlichen Prozess-Mittelwerten und Standardabweichungen ermöglicht und verwendet werden kann, um zu bestimmen, welcher Messschritt die größte prozentuale TMU (%TMU) hat.

**[0039]** In den obigen Gleichungen ist  $\sigma$  die Standardabweichung.  $\sigma$  kann unter Verwendung einer robusten Varianzkomponenten-Analysetechnik erzeugt werden. %TMU kann unter Verwendung nur des Werkzeug-zu-Werkzeug-Teils der Messabweichung (%TMU(Werkzeug zu Werkzeug)) berechnet werden, oder %TMU kann mit nur der durch ein Werkzeug selbst hervorgerufenen Quelle der Messabweichung (%TMU(Genauigkeit)) berechnet werden, oder mit beidem (%TMU(gesamt)). Man beachte, dass  $\sigma(Messung)$  der Begriff ist, der sowohl die Werkzeug-zu-Werkzeug-Messabweichung als auch die nur durch das Werkzeug selbst hervorgerufene Messabweichung (im-Werkzeug- Messabweichung) umfasst, wie oben gezeigt.

**[0040]** Der Einfluss der Messunsicherheit auf die Steuerungsgrenzbreite kann mit einer TMU-Steuerungsgrenzwirkungsmetrik (TMU-CLI; im Englischen „TMU control limit impact metric“) ausgedrückt werden, die nachfolgend in Gleichung 5 definiert ist.

$$TMU\ CLI = 1 - \frac{\sqrt{\sigma(Gesamtprozess)^2 - \sigma(Messung)^2}}{\sigma(Gesamtprozess)}$$

Gleichung 5

**[0041]** Die TMU-CLI drückt die Zunahme der TMU-Prozessgrenzen eines Herstellers aufgrund der TMU aus. Wenn beispielsweise  $\sigma(\text{Gesamtprozess})$  auf zehn Einheiten geschätzt wird und  $\sigma(\text{Messung})$  drei Einheiten beträgt, dann ist %TMU 0,3 und TMU-CLI 0,046 oder 4,6%. Es kann eine Erhöhung der Prozesssteuerungsgrenzbreite um 4,6% aufgrund der Gesamtmessunsicherheit vorliegen. Dies ist auch in **Fig. 5** zu sehen.

**[0042]** TMU und TMU-CLI können helfen, die Auswirkungen eines Werkzeugs auf die Prozesssteuerung zu beschreiben. Beides kann verwendet werden, da beide ein ähnliches Ranking der relativen Abweichung des Messsystems über Fertigungsschritte hinweg bieten können. Durch die Verwendung der TMU und TMU-CLI können daher Bedenken sowohl von Herstellern angesprochen werden, die einen Echtzeitmonitor wünschen, als auch von Werkzeug-/Maschinenherstellern, die ein Verfahren wünschen, das bei einer Änderung der Stichprobengröße nicht disproportional alarmiert. %TMU und TMU-CLI bieten den zusätzlichen Vorteil der Messung von relativen Auswirkungen zwischen den Fertigungsschritten beziehungsweise über die Fertigungsschritte hinweg. Messungen bei der Fertigung können beispielsweise den spezifischen Widerstand, die Ebenheit, die Dicke, die Kontamination, die Gleichförmigkeit, das Profiltiefe, die Ätzselektivität, die kritische Dimension oder andere Messungen einschließen. Im Allgemeinen sind Fertigungsmessungen im Fertigungsprozess gemessene Messungen.

**[0043]** **Fig. 6** bis **Fig. 9** zeigen ein Beispiel. Es gibt vier hypothetische Messschritte in den **Fig. 6** und **Fig. 8**, die bei der Herstellung hinsichtlich der Dicke eines Films in einem schichtweisen Abscheidungsprozess gemessen werden. Die „wahren“ Messbeiträge und ihre relativen Größen werden jeweils gezeigt. Da bei jedem Prozessschritt in der Produktion nicht jede Einheit gemessen wird, kann es bei den vier Messschritten zu unterschiedlichen Stichprobengrößen kommen. Schritte mit geringeren Stichprobengrößen können zu größeren zufälligen Prozessschwankungen führen. Diese zufällige Prozessabweichung kann dazu führen, dass die Messwerkzeuge im Durchschnitt unterschiedlicher erscheinen, als die Messwerkzeuge wirklich sind. Wenn keine Korrektur angewendet wird, kann die auf einer einfachen, beobachteten Standardabweichung der Messwerkzeug-Mittelwerte basierende TMU die wahre Messunsicherheit von Werkzeug zu Werkzeug überschätzen. Aus diesem Beispiel ergibt sich, dass %TMU basierend auf Varianzkomponenten eine angemessene Bewertung bieten kann, die der Realität im Durchschnitt entsprechen kann. Wenn jedoch einfache Standardabweichungen in die %TMU-Formel eingesetzt werden, dann werden die einfachen Standardabweichungen im Durchschnitt nicht erwartungstreue sein, da einfache Standardabweichungen, wie zuvor beschrieben, durch Zufallsstichprobenfehler beeinflusst werden, und liefern falsche Rankings über die Messschritte der variablen Stichprobengrößen. Daher kann die Verwendung von beobachteten Standardabweichungen ohne Korrektur der zufälligen Stichprobenabweichung zu falschen Schlussfolgerungen bezüglich Messschritten und über Messschritte hinweg führen.

**[0044]** Da es relativ teuer ist und weil Werkzeug-zu-Werkzeug-Abweichungen häufig eine größere Quelle für Störgeräusche als Genauigkeitsabweichungen sind, kann die Verwendung eines Testvehikels selektiv verwendet werden. Beispielsweise kann ein Hersteller pro Messwerkzeugtyp einen oder mehrere Messschritte auswählen, um die Genauigkeit auf einer periodischen Basis zu bewerten. Bei Messschritten, bei denen sowohl Werkzeug-zu-Werkzeug-Abweichungen als auch Genauigkeitsabweichungen gemessen werden, kann deren Gesamtwirkung bewertet werden.

**[0045]** In einer Ausführungsform werden vorhandene Produktionsdaten für eine Zeitspanne analysiert. Diese Zeitspanne kann jeder Monat, jede Woche oder andere Zeiträume sein. Quellen für Abweichungen (Variationen) werden unter Verwendung einer robusten Varianzkomponentenanalyse aufgeteilt. Varianzkomponenten werden typischerweise auf experimentelle Daten angewendet. Bei der Überwachung über Lots (Chargen) hinweg kann die Robustheit von Ausreißern und gegebenenfalls kleinen Mengen berücksichtigt werden.

**[0046]** Eine TMU (beispielsweise %TMU) und / oder TMU-CLI kann für jeden Fertigungsschritt unter Verwendung des Messwerkzeugtyps berechnet werden.

**[0047]** Es kann ein Ranking durchgeführt werden, was Verbesserungen bewirken kann. Fertigungsschritte mit hoher TMU können für die Untersuchung in eine Rangfolge gebracht werden. Beispielsweise können Verbesserungen durch TMU gefördert werden.

**[0048]** **Fig. 1** ist ein Flussdiagramm einer Ausführungsform eines Verfahrens **100**. Produktionsdaten werden empfangen (**Schritt 101**). Diese Produktionsdaten können von einer Vielzahl von Fertigungswerkzeugen und / oder einer Vielzahl von Inspektions- oder Metrologiewerkzeugen (Messwerkzeugen) stammen. Die Produktionsdaten können sich auf ein Bauelement beziehen, das mit den Fertigungswerkzeugen hergestellt wird, wie beispielsweise ein Halbleiterwafer, der in einem der Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge überprüft wird.

Wenn beispielsweise die Filmdicke in zehn Schritten im Herstellungsprozess unter Verwendung eines Satzes von äquivalenten Filmdickenmesswerkzeugen gemessen wird, kann die Standardabweichung der Gesamtfilmdicke des hergestellten Films für jeden Schritt in Werkzeug-zu-Werkzeug-Messabweichungen und in durch ein Werkzeug selbst hervorgerufene Abweichungen (im-Werkzeug-Abweichungen) unterteilt werden. Um diese Analyse durchzuführen, wird eine Varianzkomponentenanalyse aus den Produktionsdaten durchgeführt (Schritt 102). Die Varianzkomponentenanalyse schätzt die Werkzeug-zu-Werkzeug-Standardabweichung, die Standardabweichung des Gesamtprozesses oder andere Standardabweichungen. Die TMU wird aus den Produktionsdaten berechnet (Schritt 103). Die Fertigungsschritte werden anhand der TMU verglichen (Schritt 104). Beispielsweise können die Fertigungsschritte anhand der TMU wie beispielsweise durch Auflisten oder in Rangfolge bringen nach der TMU verglichen werden.

**[0049]** Das Verfahren 100 kann ferner ein Berechnen der TMU-Steuerungsgrenzwirkung (CLI) aus den Produktionsdaten und ein Einordnen (Ranking) der Fertigungsschritte durch die TMU-CLI unter Verwendung des Prozessors umfassen. Das Ranking kann als eine Metrik für die Priorisierung der Korrekturmaßnahmen nach Auswirkungen auf die Fertigung verwendet werden. Wenn beispielsweise zehn Fertigungsschritte Filmdickenmessungen haben und die Auswirkung der Filmdickenmessung mit %TMU (oder TMU-CLI) für diese zehn Schritte priorisiert wurde, dann können die Messschritte mit dem größten %TMU auf mögliche Verbesserungen untersucht werden. Die Verbesserungen können nach einer Rangfolge (Ranking) sortiert werden, von der die Hersteller den größten Nutzen für die gesamte Prozesssteuerung haben. Der Hersteller möchte möglicherweise ein Ziel, bei dem sich die %TMU auf einem wünschenswerten Niveau befindet und ab dem der Hersteller antworten möchte. Ein solches Ziel kann von der Industrie sein oder kann anwendungsspezifisch sein. Auf diese Weise können Produktionsmessungen verwendet werden, um die relativen Werkzeug-zu-Werkzeug-Messauswirkungen zu bestimmen, ohne dass ein Testvehikel wie ein spezieller Referenzwafer erforderlich ist und ohne für eine kleine oder große Stichprobengröße nachteilig zu sein.

$$\%TMU \text{ Werkzeug zu Werkzeug} = \frac{\sigma(\text{Werkzeug zu Werkzeug})}{\sigma(\text{Gesamtprozess})} \quad \text{Gleichung 6}$$

$$TMU \text{ CLI Werkzeug zu Werkzeug} = 1 - \frac{\sqrt{\sigma(\text{Gesamtprozess})^2 - \sigma(\text{Werkzeug zu Werkzeug})^2}}{\sigma(\text{Gesamtprozess})} \quad \text{Gleichung 7}$$

$$\%TMU \text{ Genauigkeit} = \frac{\sigma(\text{Genauigkeit})}{\sigma(\text{Gesamtprozess})} \quad \text{Gleichung 8}$$

**[0050]** In einem anderen Beispiel kann die Genauigkeit oder im-Messwerkzeug-Abweichung eines bestimmten Werkzeugs analysiert werden. Produktionsmessungen können bei dieser Analyse möglicherweise nicht verwendet werden, da Produktionsmessungen Prozessabweichungen im Laufe der Zeit mit Messwerkzeuggenauigkeitsabweichungen im Laufe der Zeit verwechseln können. Das Verfahren 100 kann ein Empfangen von Messdaten eines Testvehikels von einem Messwerkzeug umfassen, was als eine regelmäßige Überwachung (Monitoring) des Zustands des Messsystems durchgeführt werden kann, beispielsweise von einem Inspektions- oder Metrologieschritt. Ein Testvehikel wie etwa ein Referenzwafer kann verwendet werden, um die Messdaten zu erhalten. Eine Varianzkomponentenanalyse kann durchgeführt werden, um die Standardabweichung oder Genauigkeit zu schätzen. %TMU-Genauigkeit, TMU-CLI-Genauigkeit, Gesamt %TMU und Gesamt-TMU-CLI können berechnet werden. Die Ergebnisse können verwendet werden, um die Messschritte nach TMU oder TMU-CLI zu ordnen. Beispielsweise zeigt Fig. 4 ein beispielhaftes Pareto priorisierter Verbesserungen verschiedener Messschritte. Das Anpassen der Messschritte mit einer höheren TMU kann die größte Verbesserung der gesamten Prozesssteuerung eines Herstellungsverfahrens bieten. In einem anderen Beispiel zeigt Fig. 5 ein beispielhaftes Ranking der TMU-CLI. Das Anpassen der Messschritte oder Werkzeuge mit der höheren TMU-CLI kann die größte Verbesserung der gesamten Prozesssteuerung eines Herstellungsverfahrens bieten.

**[0051]** Basierend auf dem Vergleich (beispielsweise Auflisten oder Ranking) von Fertigungsschritten anhand der TMU mit entweder Produktionsdaten oder Messdaten können eines oder mehrere der Fertigungswerkzeuge und / oder eines oder mehrere der Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge angepasst werden.

**[0052]** Die Schritte des Verfahrens **100** können unter Verwendung eines Prozessors ausgeführt werden, wie beispielsweise des Prozessors **205** in **Fig. 2**. Die Varianzkomponentenanalyse, die Berechnung der TMU und der Vergleich der TMU für die Fertigungsschritte können kontinuierlich durchgeführt werden.

**[0053]** In einem bestimmten Beispiel wird eine Werkzeug-zu-Werkzeug-Prozesssteuerung bezüglich einer Filmdicke durchgeführt. Produktionsdaten für alle Messschritte, die sich auf die Filmdicke beziehen, werden analysiert. Eine robuste Varianzkomponentenanalyse kann verwendet werden, um die Werkzeug-zu-Werkzeug-Standardabweichung von der Standardabweichung zu trennen. Diese Analyse kann Aufschluss darüber geben, welcher der Messschritte am störendsten ist oder die meisten Defekte aufweist. Ein Hersteller ist möglicherweise nur an der Überwachung und dem Ranking von Messschritten für die Messung einer Werkzeug-zu-Werkzeug-Übereinstimmungskomponente der TMU und %TMU Werkzeug-zu-Werkzeug interessiert. Dies kann basierend auf Produktionsdaten analysiert werden und kann die störendste Quelle für Messabweichungen in einem Messsystem sein. Möglicherweise möchte der Hersteller dies auch mit der Genauigkeitskomponente kombinieren, um TMU zu erhalten. Wenn Genauigkeit für einige Schritte gewünscht wird, kann ein einzelner Produktionswafer unter Verwendung von Produktionsverfahren und -einstellungen zurückbehalten und wiederholt gemessen werden. Diese Daten können verwendet werden, um die TMU der Genauigkeitskomponente regelmäßig zu überwachen. Die Genauigkeits- und Werkzeug-zu-Werkzeug-Komponenten können auf diese Weise zu einer Gesamt-TMU kombiniert werden.

**[0054]** Die Erfassung von Waferdaten kann verwendet werden, um die Genauigkeit bei ausgewählten Schritten zu überwachen. Beispielsweise kann ein tägliches Testvehikel verwendet werden. Eine robuste Varianzkomponentenanalyse kann durchgeführt werden. Eine Standardabweichung der Genauigkeit kann geschätzt werden. Die TMU der Genauigkeit, die Gesamt-TMU, die TMU-CLI der Genauigkeit und die Gesamt-TMU-CLI können berechnet werden. Da diese Art der Datenerfassung ein Testvehikel und zusätzliche Zeit erfordert, kann sie für eine kleine Anzahl von Messschritten reserviert werden und ist möglicherweise nicht Teil eines Gesamt-Ranking-Schemas.

**[0055]** **Fig. 2** ist ein Blockdiagramm einer Ausführungsform einer Systemintegration. Das System **200** umfasst eine Schnittstelle **203** für eine elektronische Kommunikation mit einer Vielzahl von Fertigungswerkzeugen **201** und einer Vielzahl von Inspektions- oder Metrologiewerkzeugen **202**. Die Schnittstelle **203** kann beispielsweise ein gesicherter Server sein. Die Schnittstelle **203** steht in elektronischer Kommunikation mit einer Prozesssteuereinheit **204**. Die Prozesssteuereinheit **204** kann einen Prozessor **205**, einen Kommunikationsport **206** für eine elektronische Kommunikation mit dem Prozessor **205** und die elektronische Datenspeichereinheit **207** für eine elektronische Kommunikation mit dem Prozessor **205** aufweisen.

**[0056]** Beispiele für die Fertigungswerkzeuge **201** umfassen Abscheidewerkzeuge, Ionenimplantationswerkzeuge, Ätzwerkzeuge, Lithographiewerkzeuge oder chemisch-mechanische Polierwerkzeuge. Beispiele für Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge **202** umfassen Rasterelektronenmikroskope, Defektdetektionswerkzeuge, Defektbeurteilungswerkzeuge, Filmdickenmesswerkzeuge, Oberflächenprofilmesswerkzeuge, Widerstandsmesswerkzeuge, Overlay-Messgeräte oder Messwerkzeuge für kritische Abmessungen. Andere Arten von Fertigungswerkzeugen sowie Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge sind möglich. Beispielsweise können verschiedene Fertigungswerkzeuge und Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge verwendet werden, wenn die hergestellten Bauelemente biomedizinische Geräte oder Elektroniken sind.

**[0057]** Die Prozesssteuereinheit **204** ist so konfiguriert, dass sie Produktionsdaten von der Vielzahl der Fertigungswerkzeuge **201** und der Vielzahl der Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge **202** empfängt, beispielsweise über die Schnittstelle **203**. Die Produktionsdaten können sich auf ein Bauelement beziehen, das unter Verwendung der Fertigungswerkzeuge **201** hergestellt wird. Das Bauelement kann beispielsweise ein Halbleiterwafer sein. Die Prozesssteuereinheit **204** kann ferner konfiguriert sein, um die Schritte des Verfahrens **100** nach **Fig. 1** durchzuführen. Die elektronische Datenspeichereinheit **207** kann so konfiguriert sein, dass sie eine Rangfolge (ein Ranking) der Fertigungsschritte anhand der TMU oder anderen Analysen speichert.

**[0058]** Die Prozesssteuereinheit **204** kann konfiguriert sein, um mindestens eines der Fertigungswerkzeuge **201** oder mindestens eines der Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge **202** basierend auf dem Vergleich der Fertigungsschritte anzupassen. Beispielsweise kann eine Einstellung an einem Werkzeug geändert werden, die Materialeingabe kann geändert werden, ein Rezept kann geändert werden oder eine Abweichung in einem Prozess kann adressiert werden.

**[0059]** Es versteht sich, dass die Prozesssteuereinheit **204** in der Praxis durch eine beliebige Kombination von Hardware, Software und Firmware implementiert werden kann. Auch können ihre hierin beschriebenen

Funktionen durch eine Einheit ausgeführt oder auf verschiedene Komponenten aufgeteilt werden, von denen jede wiederum durch eine beliebige Kombination von Hardware, Software und Firmware implementiert werden kann. Programmcode oder Anweisungen für die Prozesssteuereinheit **204** zum Implementieren der verschiedenen hierin beschriebenen Verfahren und Funktionen können in von einer Steuereinheit (Controller) lesbaren Speichermedien, beispielsweise einem Speicher in der elektronischen Datenspeichereinheit **207**, innerhalb der Prozesssteuereinheit **204**, außerhalb der Prozesssteuereinheit **204** oder Kombinationen davon gespeichert werden.

**[0060]** Die Prozesssteuereinheit **204** kann mit den Komponenten des Systems **200** auf jede geeignete Weise gekoppelt sein (beispielsweise über ein oder mehrere Übertragungsmedien, die „drahtgebundene“ und / oder „drahtlose“ Übertragungsmedien umfassen können), so dass die Prozesssteuereinheit **204** die von den Fertigungswerzeugen **201** und / oder Inspektions- oder Metrologiewerkzeugen **202** erzeugte Ausgabe empfangen kann. Die Prozesssteuereinheit **204** kann konfiguriert sein, um eine Anzahl von Funktionen unter Verwendung der Ausgabe auszuführen. Beispielsweise kann die Prozesssteuereinheit **204** konfiguriert sein, um Analyseergebnisse unter Verwendung der Ausgabe zu übertragen oder anzuzeigen. In einem anderen Beispiel kann die Prozesssteuereinheit **204** konfiguriert sein, um die Ausgabe an eine elektronische Datenspeichereinheit **207** oder ein anderes Speichermedium zu senden, ohne die Ausgabe zu analysieren. Die Prozesssteuereinheit **204** kann ferner, wie hierin beschrieben, konfiguriert sein.

**[0061]** Die Prozesssteuereinheit **204**, mindestens ein anderes System oder mindestens ein anderes Subsystem, die hierin beschrieben sind, können verschiedene Formen annehmen, einschließlich eines Personalcomputersystems, eines Bildcomputers, eines Mainframe-Computersystems, einer Workstation, eines Netzwerkgeräts, eines Internetgeräts oder anderes Geräts. Im Allgemeinen kann die Prozesssteuereinheit **204** einen oder mehrere Prozessoren aufweisen, die Anweisungen von einem Speichermedium ausführen. Das mindestens eine Subsystem oder das mindestens eine System können auch einen beliebigen geeigneten aus dem Stand der Technik bekannten Prozessor umfassen, beispielsweise einen Parallelprozessor. Außerdem können das mindestens eine Subsystem oder das mindestens eine System eine Plattform mit Hochgeschwindigkeitsverarbeitung und Software umfassen, entweder als Standalone-Werkzeug oder als vernetztes Werkzeug.

**[0062]** Falls das System mehr als ein Subsystem umfasst, können die verschiedenen Subsysteme so miteinander gekoppelt sein, dass Bilder, Daten, Informationen, Anweisungen und so weiter zwischen den Subsystemen gesendet werden können. Zum Beispiel kann ein Subsystem durch ein beliebiges geeignetes Übertragungsmedium, das beliebige geeignete drahtgebundene und / oder drahtlose Übertragungsmedien aus dem Stand der Technik umfassen kann, mit mindestens einem zusätzlichen Subsystem gekoppelt sein. Zwei oder mehr solcher Subsysteme können auch durch ein gemeinsam genutztes computerlesbares Speichermedium (nicht gezeigt) effektiv gekoppelt werden.

**[0063]** Eine zusätzliche Ausführungsform betrifft ein nichtflüchtiges computerlesbares Medium, das Programmanweisungen speichert, die auf einer Prozesssteuereinheit oder einer anderen Steuereinheit ausführbar sind, um ein computerimplementiertes Prozesssteuerverfahren auszuführen, wie hierin offenbart. Wie insbesondere in **Fig. 2** gezeigt, kann die elektronische Datenspeichereinheit **207** oder ein anderes Speichermedium ein nichtflüchtiges computerlesbares Medium umfassen, das Programmanweisungen umfasst, die auf der Prozesssteuereinheit **204** ausführbar sind. Das computerimplementierte Verfahren kann einen oder mehrere Schritte eines oder mehrerer Verfahren umfassen, die hierin beschrieben sind.

**[0064]** Programmanweisungen, die Verfahren wie die hierin beschriebenen implementieren, können auf einem computerlesbaren Medium gespeichert sein, wie beispielsweise in der elektronischen Datenspeichereinheit **207** oder einem anderen Speichermedium. Das computerlesbare Medium kann ein Speichermedium sein, wie beispielsweise eine magnetische oder optische Platte, ein Magnetband oder ein anderes geeignetes nichtflüchtiges computerlesbares Medium, das aus dem Stand der Technik bekannt ist.

**[0065]** Die Programmanweisungen können auf verschiedene Arten implementiert werden, einschließlich, unter anderen, prozedurbasierter Techniken, komponentenbasierter Techniken und / oder objektorientierter Techniken. Beispielsweise können die Programmanweisungen unter Verwendung von ActiveX-Steuerelementen, C++ Objekten, JavaBeans, Microsoft Foundation Classes („MFC“), SSE (Streaming SIMD Extension) oder anderen Technologien oder Methoden je nach Wunsch implementiert werden.

**[0066]** Die TMU kann als ein Langzeit-Zustandsmonitor verwendet werden, um den Zustand beziehungsweise das Befinden eines Messsystems widerzuspiegeln, anstatt den Zustand beziehungsweise das Befinden ad hoc zu überwachen, indem ein Standalone TMU-Experiment oder gelegentliche Überwachungsmessungen von

Testwafern verwendet werden. Beispielsweise kann die Prozesssteuereinheit Produktionsdaten kontinuierlich überwachen.

**[0067]** Die TMU kann durch ein statistisches Prozesssteuerungs- (SPC, im Englischen „statistical process control“) -Chart-Gesamtsigma normalisiert werden, um eine relative Skala zu haben, mit der Gelegenheiten für Messsystemhardware und / oder Messrezeptverbesserungen zu priorisieren sind. Eine höhere %TMU bei einigen Messschritten (beispielsweise 40%) kann eine größere relative Standardabweichung des Messwerkzeugs zeigen als eine niedrigere %TMU (beispielsweise 10%).

**[0068]** Software kann verwendet werden, um einen Bericht zu generieren, der beispielsweise einen fortlaufenden Trend der TMU innerhalb eines Messschritts und einen Pareto über Messschritte hinweg zeigt. Dieser Bericht kann sich beispielsweise über ein Toolset und einen Messschritt erstrecken.

**[0069]** Eine Rückmeldung kann auch an ein oder mehrere Werkzeuge basierend auf der Analyse erfolgen. Bei Messschritten mit hoher TMU kann ein Benutzer mögliche Hardware- oder Software-Korrelationen finden, um ein Problem zu beheben.

**[0070]** Ein bestimmtes Fertigungswerkzeug und ein bestimmtes Inspektions- oder Metrologiewerkzeug können konsistent zusammen verwendet werden. Die Verwendung von Kammern und Werkzeugen kann randomisiert werden, um systematische Fehler (mangelnde Erwartungstreue) beim Abgleich zu verhindern, da zugeordnete Werkzeuge die Verwendung der TMU beeinflussen können. Im Extremfall, wenn ein Prozesswerkzeug (**A, B, C**) einem Messwerkzeug (**A, B, C**) auf eine eins-zueins-Weise zugeordnet ist, dann wird die Abweichung des Prozesswerkzeugs vollständig mit der Abweichung des Messwerkzeugs verwechselt. Wenn ein Zufallsschema unterstützt wird, ist ein Maß für den Zustand des Messwerkzeugs unabhängig vom Zustand des Fertigungswerkzeugs vorhanden. Aus diesem Grund kann die TMU für zugeordnete Systeme die verschiedenen Einflüsse möglicherweise nicht voneinander trennen. In bestimmten Situationen können Hersteller jedoch immer noch die TMU für zugeordnete Systeme verwenden.

**[0071]** Die Bereitstellung einer standardisierten Technik zur Überwachung aller Messschritte anstelle von nur wenigen Messschritten bietet Vorteile für Halbleiterhersteller oder andere Hersteller komplexer Produkte. Für komplexe Produkte können mehrere Messschritte vorgesehen sein. Defekte in einem Messschritt können sich leicht auf einen anderen Messschritt auswirken. Durch die Überwachung aller Messschritte kann der gesamte Fertigungsprozess besser verstanden werden.

**[0072]** Die hierin offenbarten Techniken verwenden Produktionsherstellungsdaten zum Berechnen einer robusten Varianzkomponentenanalyse. Dies liefert bessere Ergebnisse als ein entworfenes Experiment, da es die tatsächlichen Produktionsbedingungen widerspiegelt. Die in der Analyse verwendeten Eingabedaten können von einem beliebigen Fertigungswerkzeug bereitgestellt werden. Die Analyse kann automatisch und / oder in Echtzeit durchgeführt werden.

**[0073]** Die Verwendung der %TMU und TMU-CLI kann sich auf die Auswirkung auf die wahre Prozessabweichung konzentrieren. Die Arbeit an Messschritten mit niedriger TMU führt daher wahrscheinlich nicht zu einer spürbaren Auswirkung auf einen Steuerungs-Chart. Dies kann einem Hersteller helfen, Prozesssteuerungsprobleme effizienter anzugehen.

**[0074]** Die Verwendung der TMU stellt auch eine potentielle Technik bereit, um aggressivere Rezepte in der Produktion zu unterstützen. Rezepte mit niedriger Erfassungsrate mit einem wahren Übereinstimmungsproblem können lokalisiert werden. Dies kann die Zusammenarbeit mit realen Produktionsdaten ermöglichen. Dies kann auch zu Verbesserungen mit einer vollständigen Rückkopplungsschleife führen, um ein Produktionsergebnis zu überprüfen.

**[0075]** Obwohl die vorliegende Offenbarung in Bezug auf eine oder mehrere bestimmte Ausführungsformen beschrieben wurde, versteht es sich, dass andere Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung möglich sind, ohne vom Schutzmfang der vorliegenden Offenbarung abzuweichen. Daher wird die vorliegende Offenbarung nur durch die beigefügten Ansprüche und deren angemessene Auslegung eingeschränkt.

## Patentansprüche

1. System umfassend:

eine Schnittstelle für eine elektronische Kommunikation mit einer Vielzahl von Fertigungswerkzeugen und einer Vielzahl von Inspektions- oder Metrologiewerkzeugen; und  
eine Prozesssteuereinheit für eine elektronische Kommunikation mit der Schnittstelle, wobei die Prozesssteuereinheit konfiguriert ist zum:

Empfangen von Produktionsdaten von der Vielzahl der Fertigungswerkzeuge und der Vielzahl der Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge, wobei die Produktionsdaten Messungen von einem oder mehreren unter Verwendung der Fertigungswerkzeuge hergestellten Bauelementen umfassen;

Durchführen einer Varianzkomponentenanalyse aus den Produktionsdaten, wobei die Varianzkomponentenanalyse konfiguriert ist, um die Werkzeug-zu-Werkzeug-Standardabweichung und die Gesamtstandardabweichung zu schätzen;

Berechnen einer Gesamtmeßunsicherheit (TMU) aus den Produktionsdaten; und

Vergleichen von Fertigungsschritten anhand der TMU;

wobei die Prozesssteuereinheit eine elektronische Datenspeichereinheit umfasst, die konfiguriert ist, um eine Liste der Fertigungsschritte anhand der TMU zu speichern.

2. System nach Anspruch 1, wobei die Prozesssteuereinheit einen Prozessor und einen Kommunikationsport für eine elektronische Kommunikation mit dem Prozessor und die elektronische Datenspeichereinheit umfasst.

3. System nach Anspruch 1, wobei das Bauelement ein Halbleiterwafer ist.

4. System nach Anspruch 1, wobei die Prozesssteuereinheit ferner konfiguriert ist zum:

Berechnen einer TMU-Steuerungsgrenzwirkung (CLI) aus den Produktionsdaten; und

Vergleichen von Fertigungsschritten anhand der TMU-CLI.

5. System nach Anspruch 1, wobei die Prozesssteuereinheit zudem konfiguriert ist, um mindestens eines der Fertigungswerkzeuge oder mindestens eines der Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge auf Basis des Vergleichs der Fertigungsschritte anzupassen.

6. System nach Anspruch 1, wobei die Prozesssteuereinheit ferner konfiguriert ist zum:

Empfangen von Messdaten für ein Testvehikel von einem der Fertigungswerkzeuge oder einem der Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge;

Durchführen einer Varianzkomponentenanalyse aus den Messdaten, wobei die Varianzkomponentenanalyse die Standardabweichung der Genauigkeit schätzt;

Berechnen der TMU für die Genauigkeit, der Gesamt-TMU, der TMU-CLI-Genauigkeit und der Gesamt-TMU-CLI; und

Vergleichen der Ergebnisse für die Messdaten anhand der TMU oder TMU-CLI.

7. System nach Anspruch 6, wobei die Prozesssteuereinheit ferner konfiguriert ist, um das Fertigungswerkzeug oder das Inspektionswerkzeug basierend auf dem Vergleich der Ergebnisse für die Messdaten anzupassen.

8. System nach Anspruch 1, wobei die Schnittstelle ein gesicherter Server ist.

9. System nach Anspruch 1, wobei die Prozesssteuereinheit dazu konfiguriert ist, die Varianzkomponentenanalyse kontinuierlich durchzuführen, die TMU zu berechnen und die Fertigungsschritte zu vergleichen.

10. Verfahren, umfassend:

Empfangen von Produktionsdaten von einer Vielzahl von Fertigungswerkzeugen und einer Vielzahl von Inspektions- oder Metrologiewerkzeugen an einem Prozessor, wobei die Produktionsdaten Messungen von einem oder mehreren Bauelementen umfassen, die unter Verwendung der Fertigungswerkzeuge hergestellt werden; Durchführen einer Varianzkomponentenanalyse aus den Produktionsdaten unter Verwendung des Prozessors, wobei die Varianzkomponentenanalyse die Werkzeug-zu-Werkzeug-Standardabweichung und die Gesamtstandardabweichung schätzt;

Berechnen einer Gesamtmeßunsicherheit (TMU) aus den Produktionsdaten unter Verwendung des Prozessors; und

Vergleichen von Fertigungsschritten anhand der TMU unter Verwendung des Prozessors.

11. Verfahren nach Anspruch 10, ferner umfassend:

Berechnen einer TMU-Steuerungsgrenzwirkung (CLI) aus den Produktionsdaten unter Verwendung des Prozessors; und

Vergleichen von Fertigungsschritten anhand der TMU-CLI unter Verwendung des Prozessors.

12. Verfahren nach Anspruch 10, wobei das Bauelement ein Halbleiterwafer ist.

13. Verfahren nach Anspruch 10, ferner umfassend ein Anpassen von mindestens einem der Fertigungswerkzeuge oder von mindestens einem der Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge auf Basis des Vergleichs der Fertigungsschritte.

14. Verfahren nach Anspruch 10, ferner umfassend:

Empfangen von Messdaten für ein Testvehikel von einem der Fertigungswerkzeuge oder einem der Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge an dem Prozessor;

Durchführen einer Varianzkomponentenanalyse aus den Messdaten unter Verwendung des Prozessors, wobei die Varianzkomponentenanalyse die Standardabweichung der Genauigkeit schätzt;

Berechnen der TMU für die Genauigkeit, der Gesamt-TMU, der TMU-CLI-Genauigkeit und der Gesamt-TMU-CLI unter Verwendung des Prozessors; und

Vergleichen der Ergebnisse für die Messdaten anhand der TMU oder TMU-CLI unter Verwendung des Prozessors.

15. Verfahren nach Anspruch 14, ferner umfassend ein Anpassen des Fertigungswerkzeugs oder des Inspektionswerkzeugs basierend auf dem Vergleich der Ergebnisse für die Messdaten.

16. Verfahren nach Anspruch 10, wobei das Durchführen der Varianzkomponentenanalyse, das Berechnen der TMU und das Vergleichen der Fertigungsschritte kontinuierlich durchgeführt werden.

17. Nichtflüchtiges computerlesbares Speichermedium, umfassend ein oder mehrere Programme zum Ausführen der folgenden Schritte auf einer oder mehreren Rechenvorrichtungen:

Durchführen einer Varianzkomponentenanalyse aus Produktionsdaten einer Vielzahl von Fertigungswerkzeugen und einer Vielzahl von Inspektions- oder Metrologiewerkzeugen, wobei die Produktionsdaten Messungen von einem oder mehreren Bauelementen umfassen, die mit den Fertigungswerkzeugen hergestellt werden, und wobei die Varianzkomponentenanalyse die Werkzeug-zu-Werkzeug-Standardabweichung und Gesamtstandardabweichung schätzt;

Berechnen einer Gesamt-messunsicherheit (TMU) aus den Produktionsdaten; und  
Vergleichen von Fertigungsschritten anhand der TMU.

18. Nichtflüchtiges computerlesbares Speichermedium nach Anspruch 17, wobei die Schritte ferner umfassen:

Berechnen einer TMU-Steuerungsgrenzwirkungsmetrik (CLI) aus den Produktionsdaten; und

Vergleichen von Fertigungsschritten anhand der TMU-CLI.

19. Nichtflüchtiges computerlesbares Speichermedium nach Anspruch 17, wobei die Schritte ferner umfassen:

Empfangen von Messdaten für ein Testvehikel von einem der Fertigungswerkzeuge oder einem der Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge;

Durchführen einer Varianzkomponentenanalyse aus den Messdaten, wobei die Varianzkomponentenanalyse eine Standardabweichung der Genauigkeit schätzt;

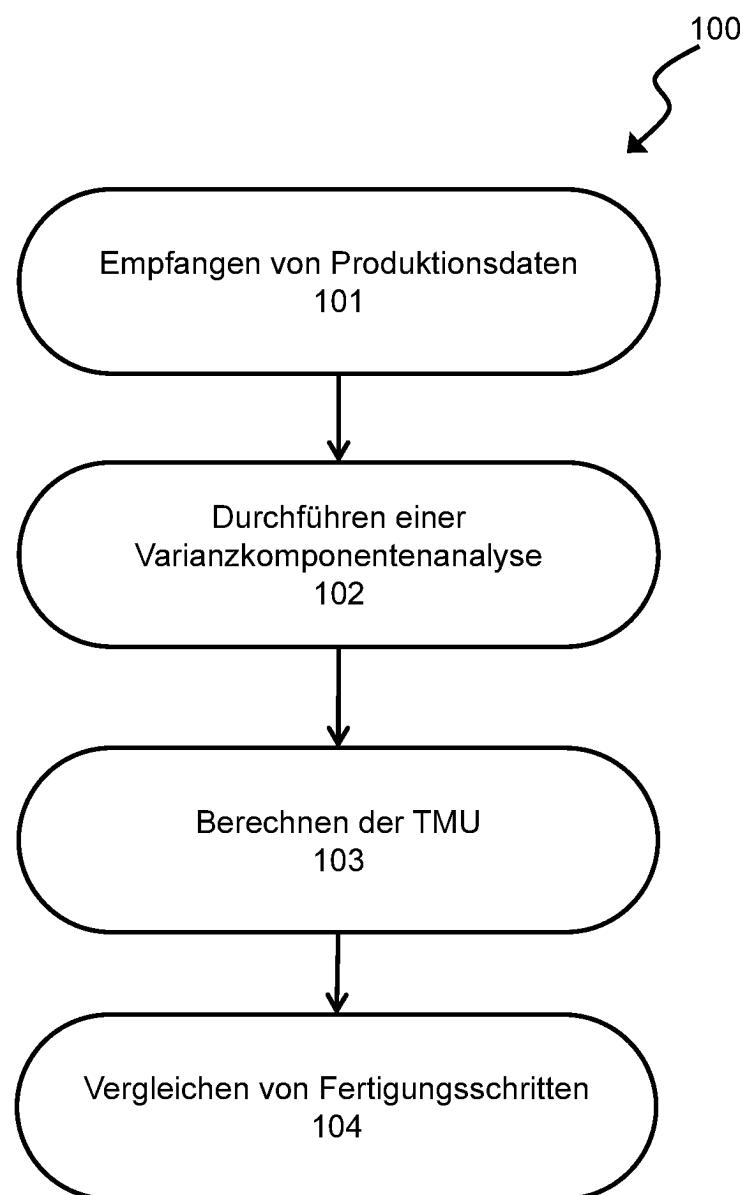
Berechnen der TMU für die Genauigkeit, der Gesamt-TMU, der TMU-CLI-Genauigkeit und der Gesamt-TMU-CLI; und

Vergleichen der Ergebnisse für die Messdaten anhand der TMU oder TMU-CLI.

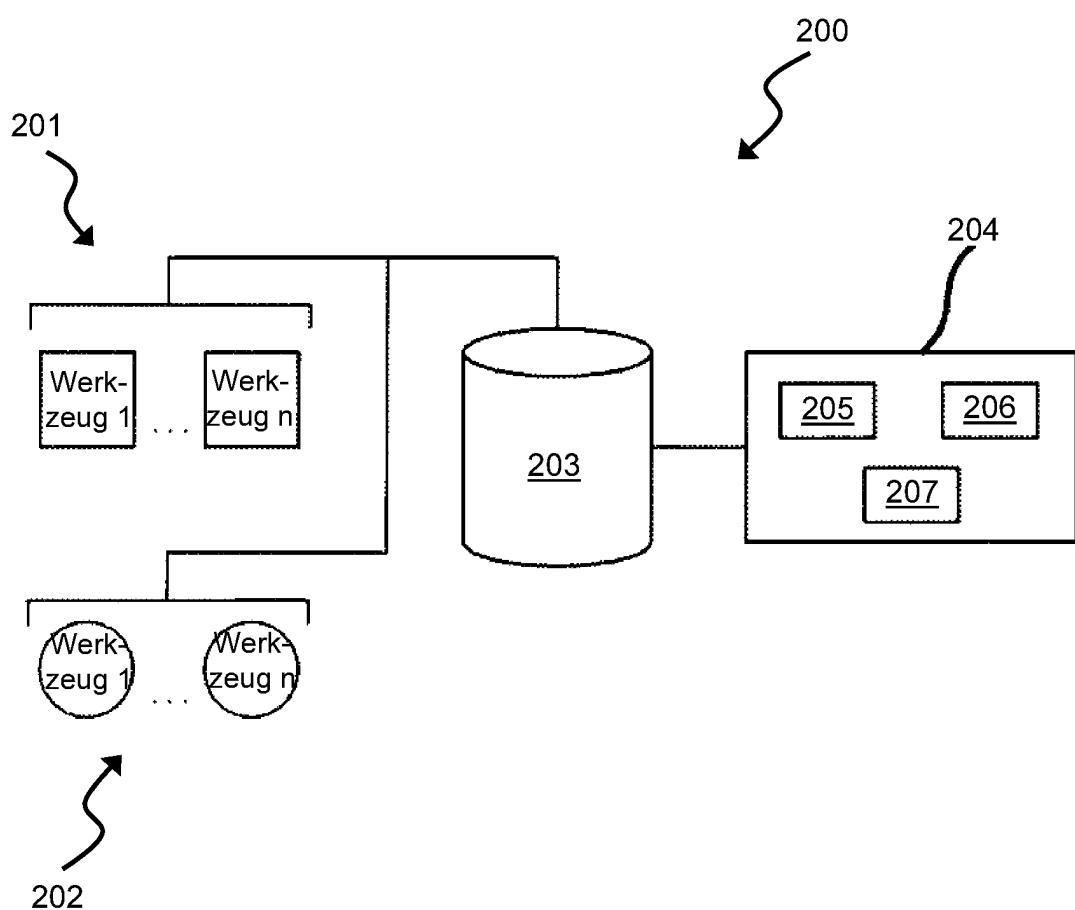
20. Nichtflüchtiges computerlesbares Speichermedium nach Anspruch 17, wobei die Schritte ferner ein Anpassen eines der Fertigungswerkzeuge oder Inspektions- oder Metrologiewerkzeuge auf Basis des Vergleichs der Fertigungsschritte umfassen.

Es folgen 8 Seiten Zeichnungen

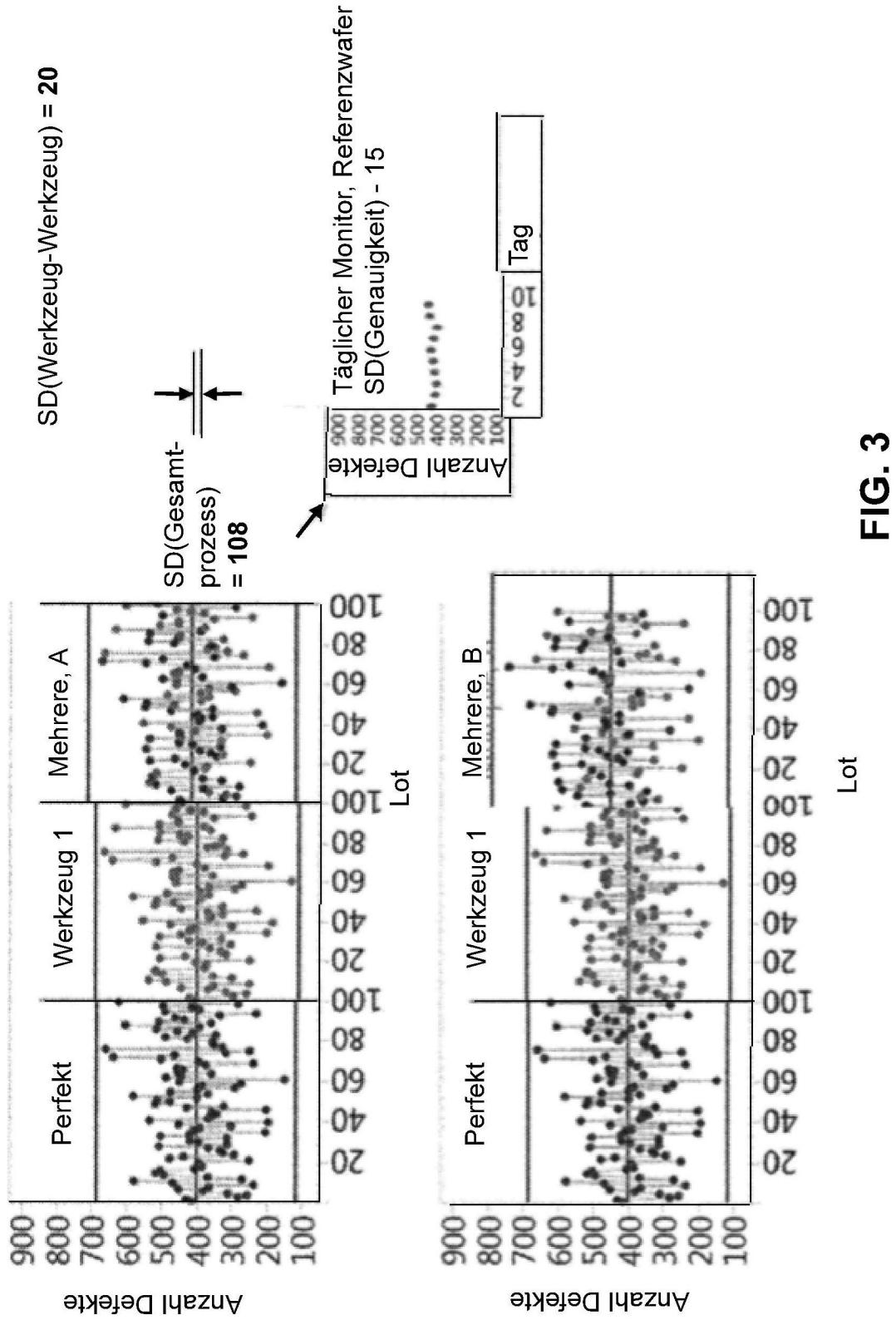
Anhängende Zeichnungen



**FIG. 1**



**FIG. 2**



### TMU Pareto von Prioritäten

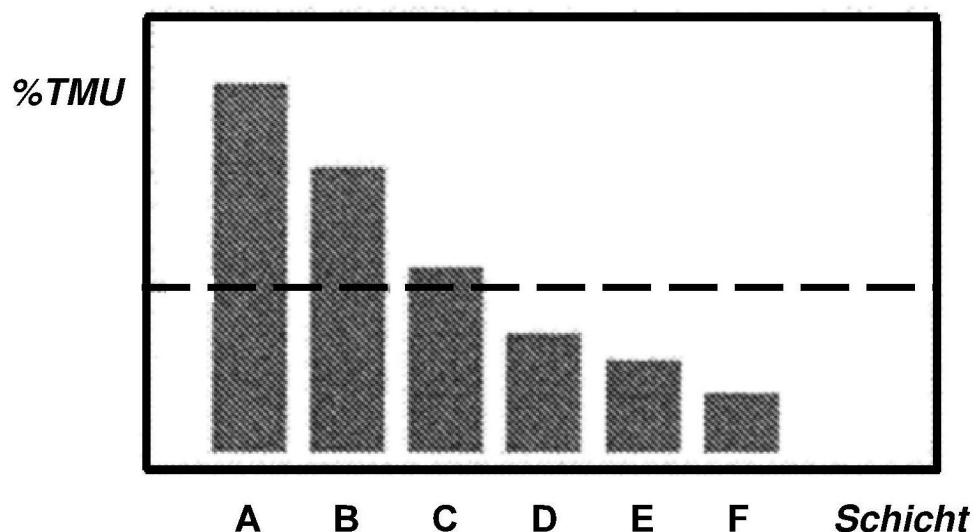


FIG. 4

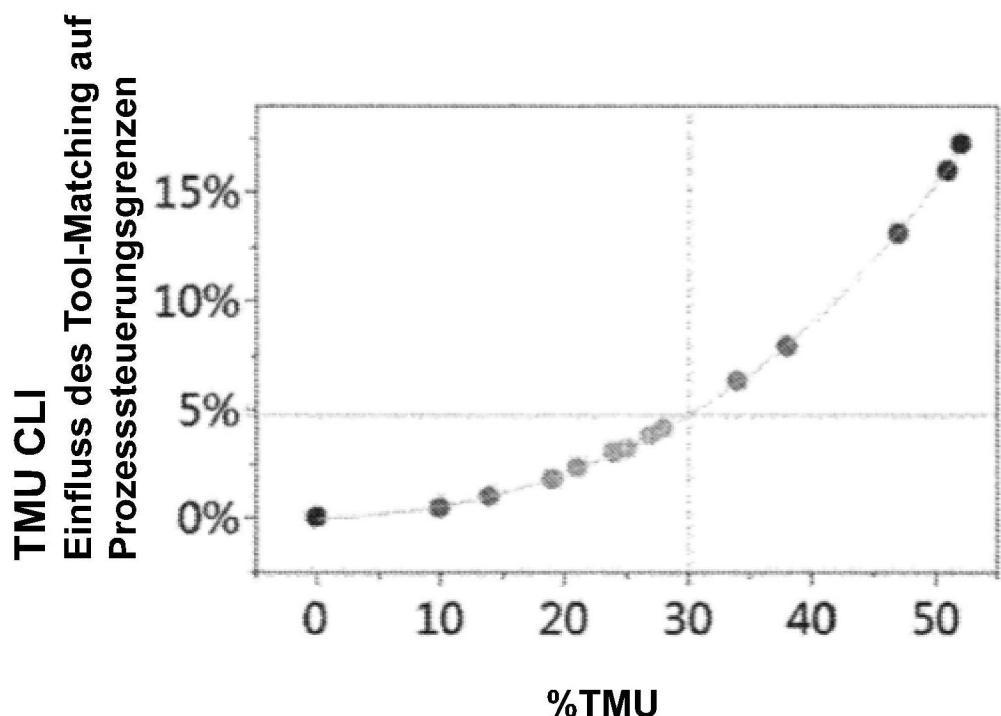


FIG. 5

Produktionsdaten Ergebnisse für Dünnenschichtmessungen		Produktionsdaten Ergebnisse für Dünnenschichtmessungen	
Messschritt A		Messschritt B	
<b>Hypothetisches wahres unbekanntes Scenario</b>		<b>Hypothetisches wahres unbekanntes Scenario</b>	
Wahre Gesamtabweichung 7,14		Wahre Gesamtabweichung 7,35	
\Wahre reine Prozess-Standardabweichung 7		Wahre Prozess-Standardabweichung 7	
Wahre Werkzeug-Werkzeug-Standardabweichung 1		Wahre Werkzeug-Standardabweichung 2	
Wahre Werkzeug-Werkzeug-Genaugkeit 1		Wahre Werkzeug-Werkzeug-Genaugkeit 1	
<b>Wahre %TMU Werkzeug-Werkzeug</b> 14%		<b>Wahre %TMU Werkzeug-Werkzeug</b> 14%	
<b>Wahre %TMU Genaugkeit</b> 14%		<b>Wahre %TMU Genaugkeit</b> 14%	
<b>Wahre %TMU Gesamt</b> 20%		<b>Wahre %TMU Gesamt</b> 30%	
<b>Messungen der Produktionseinheiten:</b>		<b>Messungen der Produktionseinheiten:</b>	
Messung Werkzeug	Stichprobengröße, Anzahl der Produktionseinheiten	Messung Werkzeug	Stichprobengröße, Anzahl der Produktionseinheiten
1	10	100,4	100
2	10	97,1	98
3	10	101,9	102,1
		1	100,9
		2	98
		3	102,1
			7,25
<b>Werkzeug-Werkzeug-Standardabweichung aller Rohdaten</b> 2,46		<b>Werkzeug-Werkzeug-Standardabweichung aller Rohdaten</b> 2,11	
<b>%TMU Werkzeug-Werkzeug, unter Verwendung einfacher Standardabweichungen</b> 33%		<b>%TMU Werkzeug-Werkzeug, unter Verwendung einfacher Standardabweichungen</b> 29%	
<b>Wurzel(Varianzkomponente(Werkzeug-Werkzeug))</b> 0,97		<b>Wurzel(Varianzkomponente(Werkzeug-Werkzeug))</b> 1,99	
<b>Wurzel(Varianzkomponente(gesamt))</b> 7,20		<b>Wurzel(Varianzkomponente(gesamt))</b> 7,28	
<b>%TMU Werkzeug-Werkzeug, unter Verwendung von Varianzkomponenten</b> 13,4%		<b>%TMU Werkzeug-Werkzeug, unter Verwendung von Varianzkomponenten</b> 27,3%	
<b>%TMU CLI Werkzeug-Werkzeug</b> 0,9%		<b>%TMU CLI Werkzeug-Werkzeug</b> 3,8%	

FIG. 6

## Messungen einer Referenzeinheit

### Messschritt B

In diesem Beispiel entscheidet der Hersteller, eine Überwachung (Monitor) des Messsystems nur für einen Messschritt durchzuführen, um die Genauigkeit zu quantifizieren. Der Messschritt mit dem höchsten Werkzeug-Werkzeug-%TMU wurde ausgewählt.

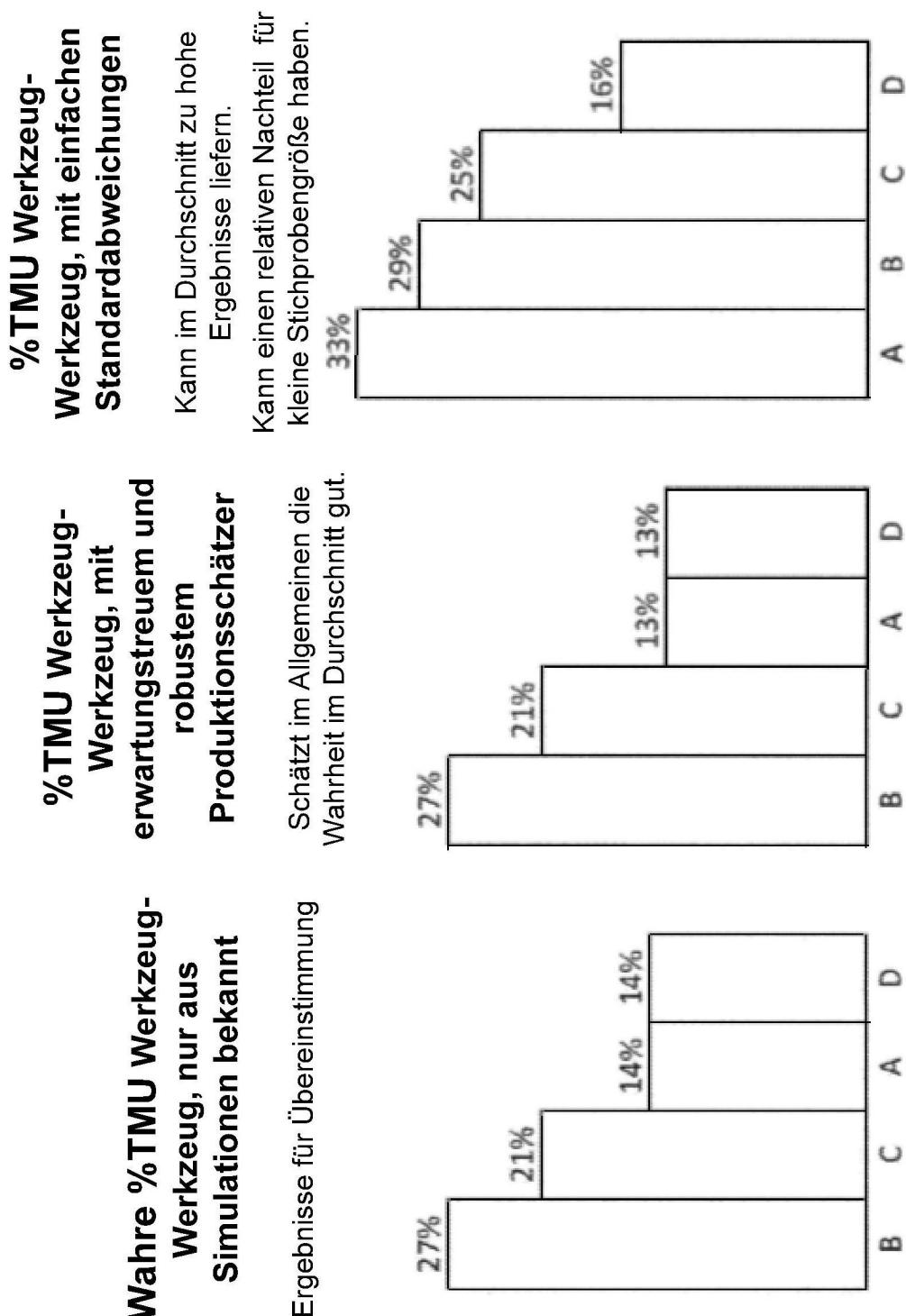
#### Messungen der Referenzeinheiten:

Messung Werkzeug	Stichprobengröße, Anzahl der wiederholten Messungen der Referenzeinheit	Standard- abweichung	RMS
1	8	0,7	
2	8	0,9	
3	8	1,2	
	0	1,0	
	0	7,31	
	0	13%	
	0	0,96	
Wurzel(Varianzkomponente(Messsystem))		2,21	
	0,0%	13,1%	
	0,0%	30,3%	
%TMU CLI gesamt		4,7%	

**FIG. 7**

Produktionsdaten		Ergebnisse für Dünn schichtmessungen		Produktionsdaten		Ergebnisse für Dünn schichtmessungen	
		Messschritt C				Messschritt D	
<b>Hypothetisches wahres unbekanntes Scenario</b>				<b>Hypothetisches wahres unbekanntes Scenario</b>			
Wahre Gesamtabweichung	7,23	Wahre Prozess-Standardabweichung	7	Wahre Gesamtabweichung	7,14	Wahre Prozess-Standardabweichung	7
\Wahre reine Prozess-Standardabweichung	7	Wahre Werkzeug-Standardabweichung	1,5	Wahre Werkzeug-Standardabweichung	1	Wahre Werkzeug-Standardabweichung	1
Wahre Werkzeug-Werkzeug-Genaugkeit	1	Wahre Werkzeug-Werkzeug-Genaugkeit	1	Wahre Werkzeug-Werkzeug-Genaugkeit	1	Wahre Werkzeug-Werkzeug-Genaugkeit	1
<b>Wahre %TMU Werkzeug-Werkzeug</b>	<b>14%</b>	<b>Wahre %TMU Werkzeug-Werkzeug</b>	<b>14%</b>	<b>Wahre %TMU Werkzeug-Werkzeug</b>	<b>14%</b>	<b>Wahre %TMU Werkzeug-Werkzeug</b>	<b>14%</b>
<b>Wahre %TMU Genaugkeit</b>	<b>14%</b>	<b>Wahre %TMU Genaugkeit</b>	<b>14%</b>	<b>Wahre %TMU Genaugkeit</b>	<b>14%</b>	<b>Wahre %TMU Genaugkeit</b>	<b>14%</b>
<b>Wahre %TMU Gesamt</b>	<b>25%</b>						
<b>Messungen der Produktionseinheiten:</b>		<b>Messungen der Produktionseinheiten:</b>		<b>Messungen der Produktionseinheiten:</b>		<b>Messungen der Produktionseinheiten:</b>	
Messung	Werkzeug	Stichprobengröße, Anzahl der Produktionseinheiten	Durchschnitt abweichung	Messung	Werkzeug	Stichprobengröße, Anzahl der Produktionseinheiten	Durchschnitt abweichung
1		50	100,7	7,25	1	100	100,2
2		50	98,4	5,8	2	100	99,1
3		50	101,9	7,8	3	100	101,4
							7,25
							5,8
							7,8
<b>Werkzeug-Werkzeug-Standardabweichung aller Rohdaten</b>		<b>1,78</b>	<b>7,0</b>	<b>Werkzeug-Werkzeug-Standardabweichung aller Rohdaten</b>		<b>1,15</b>	<b>7,0</b>
<b>%TMU Werkzeug-Werkzeug, unter Verwendung einfacher Standardabweichungen</b>		<b>7,22</b>	<b>0,9900926</b>	<b>%TMU Werkzeug-Werkzeug, unter Verwendung einfacher Standardabweichungen</b>		<b>7,09</b>	<b>0,7001012</b>
<b>25%</b>				<b>16%</b>			
Wurzel(Varianzkomponente(Werkzeug-Werkzeug))		Wurzel(Varianzkomponente(Werkzeug-Werkzeug))		Wurzel(Varianzkomponente(gesamt))		Wurzel(Varianzkomponente(gesamt))	
Wurzel(Varianzkomponente(gesamt))		7,16		7,06		7,06	
<b>%TMU Werkzeug-Werkzeug, unter Verwendung von Varianzkomponenten</b>		<b>20,6%</b>		<b>%Varianzkomponenten</b>		<b>12,9%</b>	
<b>%TMU CLI Werkzeug-Werkzeug</b>		<b>2,2%</b>		<b>%Varianzkomponenten</b>		<b>0,8%</b>	

FIG. 8

**FIG. 9**