

KI-gestützte Messtechnik in der Siliziumwafer-Produktion

Dana Kaufmann, Gantner Instruments GmbH, Lauf an der Pegnitz, Deutschland
d.kaufmann@gantner-instruments.com

Abstract

Die Herstellung von Siliziumwafern für die Halbleiterindustrie erfordert höchste Präzision und Prozessstabilität. Insbesondere beim Schneiden (Dicing) und bei der Lithografie entstehen große Datenmengen, deren Analyse entscheidend für die Qualitätssicherung ist. Die Integration von Künstlicher Intelligenz (KI) in Messtechniksysteme ermöglicht eine Echtzeit-Überwachung kritischer Parameter wie Temperatur, Vibration und Schnittgeschwindigkeit. Dieser Beitrag untersucht die Lösungen von Gantner Instruments zur Implementierung von KI in die Wafer-Produktion. Vorgestellt werden Plattformen zur Datenerfassung und Steuerung (Q.series X), lokale Aggregation und Speicherung als Appliance (Q.core) und Datenerfassungslösungen in der Cloud für remote- und langzeit-Monitoring inklusive Analyse (GI.cloud), sowie deren Rolle bei der Erfassung und Analyse von Prozessdaten. Anwendungsbeispiele zeigen, wie KI-basierte Systeme die Ausbeute (Yield) erhöhen, Mikrorisse vermeiden und die Wartung von Dicing-Sägen optimieren. Abschließend wird ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen wie Edge-KI und digitale Zwillinge gegeben, die die Effizienz und Nachhaltigkeit der Halbleiterfertigung weiter steigern.

1 Status Quo

Die Halbleiterindustrie zählt zu den technologisch anspruchsvollsten Branchen weltweit und ist durch extrem hohe Anforderungen an Präzision, Reinheit und Prozessstabilität gekennzeichnet. Die Herstellung von Siliziumwafern bildet die Grundlage für nahezu alle modernen Mikroelektronikprodukte und umfasst eine Reihe komplexer Prozessschritte, darunter das Kristallziehen, das Schneiden der Wafer (Wafer-Dicing) sowie die Lithografie. Jeder dieser Schritte muss unter streng kontrollierten Bedingungen erfolgen, da selbst geringfügige Abweichungen in Temperatur, Vibration oder Schnittqualität zu erheblichen Qualitätsverlusten und hohen Ausschussraten führen können. Fehler in diesen Prozessen wirken sich nicht nur auf die Ausbeute (Yield) aus, sondern verursachen auch signifikante Kostensteigerungen in der Produktion.

Die Integration von Künstlicher Intelligenz (KI) in die Prozessüberwachung eröffnet neue Möglichkeiten zur Optimierung dieser hochsensiblen Fertigungsabläufe. KI-gestützte Systeme sind in der Lage, große Mengen an Prozessdaten in Echtzeit zu analysieren, Muster zu erkennen und Anomalien frühzeitig zu identifizieren. Dies ermöglicht eine vorausschauende Wartung (Predictive Maintenance) sowie die dynamische Anpassung von Prozessparametern, um die Qualität und Effizienz der Wafer-Produktion zu maximieren.

Gantner Instruments bietet hierfür hochpräzise Messsysteme, die sich durch ihre modulare Architektur und ihre Fähigkeit zur Integration von KI-Algorithmen auszeichnen. Die Plattformen Q.series X, GI.cloud und Q.core bilden die technologische Basis für die Erfassung und Verarbeitung kritischer Parameter wie Temperatur, Vibration

und Schnittgeschwindigkeit. Durch die Kombination dieser Hardwarelösungen mit intelligenten Analyseverfahren können Hersteller nicht nur die Prozesssicherheit erhöhen, sondern auch die Produktivität und Nachhaltigkeit ihrer Fertigungslinien verbessern.

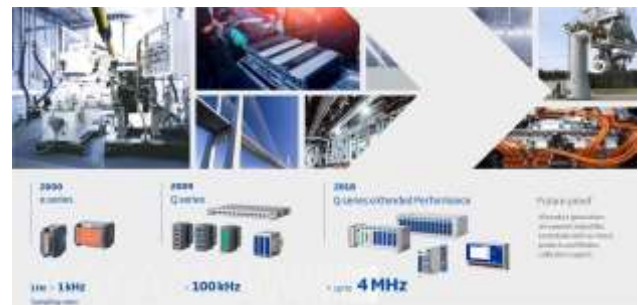


Bild 1 Entwicklung Sampling rates Quelle: Gantner Instruments GmbH

2 Anwendungen in der Waferproduktion

Die Integration von Künstlicher Intelligenz (KI) in die Wafer-Produktion bietet eine Reihe entscheidender Vorteile für die Prozesssicherheit und Effizienz. Ein zentrales Anwendungsfeld ist die vorausschauende Wartung (Predictive Maintenance) von Dicing-Sägen. Durch die kontinuierliche Analyse von Betriebsdaten können potenzielle Ausfälle frühzeitig erkannt und Wartungsmaßnahmen geplant werden, bevor es zu ungeplanten Stillständen kommt. Dies reduziert nicht nur die Ausfallzeiten, sondern senkt auch die Kosten für Notfallreparaturen.

Darüber hinaus ermöglicht die Echtzeit-Überwachung von Vibrationen eine präzise Kontrolle des Schneidpro-

kontrollierten Bedingungen betrieben werden, um die geforderte Präzision und Qualität sicherzustellen. Die Integration von Künstlicher Intelligenz (KI) ermöglicht eine signifikante Effizienzsteigerung in diesen Prozessen.

KI-Algorithmen analysieren kontinuierlich die während der Tests generierten Daten und identifizieren Muster sowie Abweichungen in Echtzeit. Auf Basis dieser Analysen können die Testparameter dynamisch angepasst werden, um die Prozessbedingungen zu optimieren. Dies führt zu einer Verkürzung der Testdauer und der gesamten Herstellungszeit, ohne die Qualität zu beeinträchtigen.

Darüber hinaus erlaubt die KI-gestützte Steuerung eine adaptive Prozessführung, die auf Veränderungen in Materialeigenschaften oder Umgebungsbedingungen reagiert. Dies ist besonders relevant in Reinraum-Umgebungen, in denen selbst kleinste Schwankungen erhebliche Auswirkungen auf die Produktqualität haben können. Durch die Kombination von präziser Messtechnik und intelligenter Datenanalyse wird nicht nur die Produktivität gesteigert, sondern auch die Ausschussrate reduziert, was zu einer höheren Ausbeute (Yield) und geringeren Produktionskosten führt.

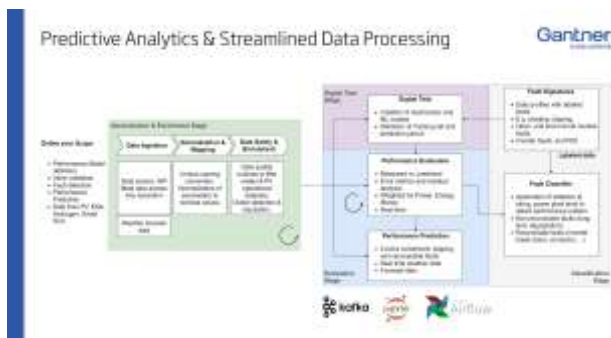


Bild 4 Predictive Analytics Quelle: Gantner Instruments GmbH

2.4 Energieeffizienz und intelligente Steuerung in der Waferproduktion

Die Herstellung von Siliziumwafern ist ein energieintensiver Prozess, der mehrere thermische und mechanische Bearbeitungsschritte umfasst, darunter Kristallziehen, Wafer-Dicing und Lithografie. Diese Prozesse erfordern eine präzise Steuerung von Temperatur, Vibration und Schnittgeschwindigkeit, um die geforderte Qualität sicherzustellen. Gleichzeitig steigt der Druck, den Energieverbrauch zu senken und die Ressourceneffizienz zu erhöhen.

KI-gestützte Systeme bieten hier entscheidende Vorteile. Durch die kontinuierliche Analyse von Sensordaten in Echtzeit können Algorithmen nicht nur Anomalien erkennen, sondern auch die Energiezufuhr dynamisch anpassen. Beispielsweise lässt sich die Heizleistung in Kristallziehöfen optimieren, um den Energieverbrauch zu reduzieren, ohne die Materialqualität zu beeinträchtigen. Ähnlich

können die Antriebsparameter von Dicing-Sägen so gesteuert werden, dass unnötige Lastspitzen vermieden werden.

Darüber hinaus ermöglicht die Integration von KI in die Produktionssteuerung die Entwicklung intelligenter Energiemanagementstrategien, die vergleichbar mit Smart-Grid-Konzepten sind. Durch die Vernetzung mehrerer Produktionslinien können Lastprofile analysiert und Energieflüsse optimiert werden. Dies trägt nicht nur zur Senkung der Betriebskosten bei, sondern unterstützt auch die Einhaltung von Nachhaltigkeitszielen und regulatorischen Vorgaben zur CO₂-Reduktion.

Langfristig wird die Kombination aus präziser Messtechnik, KI-gestützter Prozessoptimierung und intelligentem Energiemanagement die Grundlage für eine ressourcenschonende und wirtschaftlich effiziente Waferproduktion bilden.

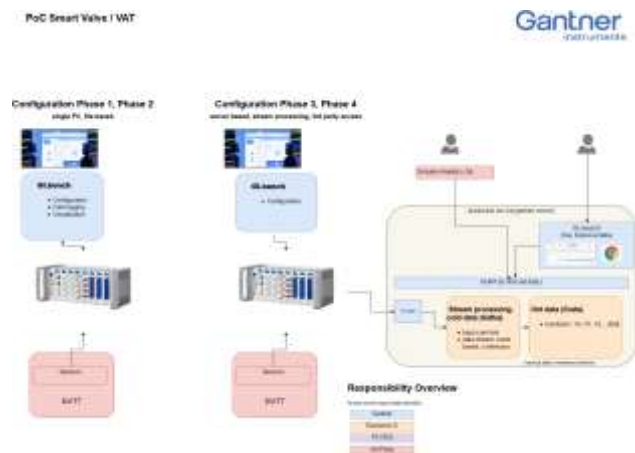


Bild 5 PoC Smart Valve Quelle: Gantner Instruments GmbH

2.5 Forschung und Entwicklung

Die Anwendung von Künstlicher Intelligenz (KI) in der Forschung und Entwicklung der Halbleiterindustrie eröffnet neue Möglichkeiten zur Analyse und Optimierung komplexer Prozesse. Insbesondere bei Strukturtests, die für die Bewertung der mechanischen und thermischen Eigenschaften von Materialien und Komponenten entscheidend sind, bietet KI erhebliche Vorteile.

Durch die Kombination von hochpräzisen Messdaten (Rohdaten plus Metadaten) mit **digitalen Zwillingen** können Ingenieure virtuelle Abbilder physischer Systeme erstellen. Diese digitalen Modelle ermöglichen die Simulation des Materialverhaltens unter unterschiedlichen Belastungs- und Umgebungsbedingungen. Auf dieser Grundlage lassen sich präzise Vorhersagen über die Lebensdauer und das Ausfallverhalten einzelner Komponenten innerhalb der Prozesskette treffen.

Produktion können digitale Zwillinge beispielsweise genutzt werden, um die Auswirkungen von Temperatur- oder Vibrationsänderungen auf die Schnittqualität zu simulieren und die Prozessparameter entsprechend anzupassen.

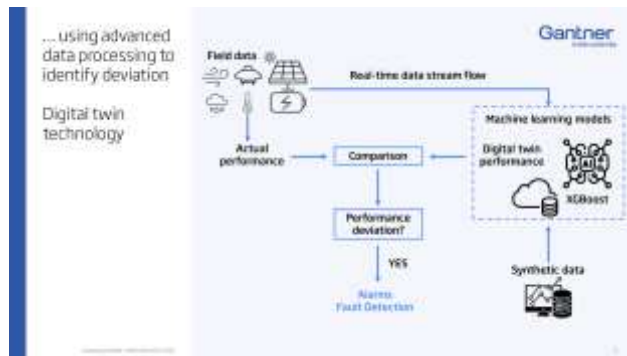


Bild 8 Digital Twin Technology Quelle: Gantner Instruments GmbH

Nachhaltigkeit wird durch den Einsatz KI-gestützter Systeme gefördert, da diese helfen, Ressourcen effizienter zu nutzen und den CO₂-Fußabdruck zu verringern. Optimierte Abläufe, vorausschauende Wartung und die Reduktion von Ausschuss tragen dazu bei, den Energieverbrauch und den Materialeinsatz zu minimieren. Dies ist nicht nur aus ökologischer Sicht relevant, sondern auch ein entscheidender Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit in einer zunehmend regulierten Industrie.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass diese Trends die Grundlage für eine intelligente, vernetzte und ressourcenschonende Produktion bilden. Sie eröffnen neue Perspektiven für die Automatisierung und die digitale Transformation der Halbleiterindustrie.

3.2 Fazit

Die fortschreitende Digitalisierung industrieller Prozesse erfordert eine enge Verzahnung von Messtechnik und datengetriebenen Analyseverfahren. Gantner Instruments positioniert sich in diesem Kontext als technologischer Vorreiter, indem jahrzehntelange Expertise in der hochpräzisen Datenerfassung mit innovativen Ansätzen der Künstlichen Intelligenz (KI) kombiniert wird. Die Produktplattformen **Q.series X**, **GL.cloud** und **Q.core** sind nicht lediglich Instrumente zur Messdatenerfassung, sondern integrale Bestandteile einer ganzheitlichen Architektur für intelligente Prozesssteuerung und datenbasierte Optimierung.

Die Integration von KI in Mess- und Prüfsysteme ermöglicht eine Transformation von rein reaktiven zu proaktiven und adaptiven Fertigungsprozessen. Durch die Echtzeit-Analyse großer Datenmengen können Anomalien frühzeitig erkannt, Wartungsmaßnahmen vorausschauend

geplant und Prozessparameter dynamisch angepasst werden. Dies führt zu einer signifikanten Steigerung der Effizienz, einer Reduktion von Ausschuss und einer Erhöhung der Ausbeute (Yield), insbesondere in hochsensiblen Branchen wie der Halbleiterindustrie.

Darüber hinaus eröffnet die Kombination aus Messtechnik und KI neue Perspektiven für die Entwicklung digitaler Zwillinge, die als virtuelle Abbilder physischer Systeme dienen und für Simulationen sowie prädiktive Optimierungen genutzt werden können. Diese Ansätze tragen nicht nur zur Verbesserung der Prozesssicherheit bei, sondern leisten auch einen entscheidenden Beitrag zur Nachhaltigkeit, indem sie den Energieverbrauch und den Materialeinsatz minimieren.

Insgesamt sind die Lösungen von Gantner Instruments als Schlüsseltechnologien für die digitale Transformation zu betrachten. Sie schaffen die Grundlage für eine intelligente, vernetzte und ressourceneffiziente Industrieproduktion und ebnen den Weg für zukünftige Innovationen in den Bereichen Industrie, Energie und Forschung.

4 Literatur / Informationsquellen

- [1] Gantner Instruments GmbH
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Edge_computing#Applications
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Deep_learning
- [4] Patrick Schnabel: Elektrotechnik Fibel
- [5] Europa Lehrmittel: Fachkunde Elektrotechnik
- [6] Microsoft Copilot: Was ist Predictive Maintenance