

Der verborgene Pfad: Wie Causal AI das Gesamtbild sichtbar macht

Michael Haft, Xplain Data GmbH

© Adobe Stock | 61971963 | VectorMine

Maschinen melden fleißig Daten, doch oft bleibt verborgen, was wirklich hinter Fehlern steckt. Wie lassen sich im Dickicht aus Zahlen, Sensorwerten und Prozessdaten jene verborgenen Ursachen aufspüren, die über Qualität und Effizienz entscheiden? Kann eine neue Generation von Künstlicher Intelligenz Licht in diese Black Box bringen?

Die moderne Fertigungsindustrie erlebt derzeit einen rasanten Anstieg des Datenvolumens, das von Maschinen generiert wird. Diese Daten sind zwar eine reichhaltige Ressource, werden jedoch bei der Optimierung von Produktionsprozessen nur unzureichend genutzt. Die gängige Datenanalyse in der Fertigung beschränkt sich häufig auf deskriptive und prädiktive Modelle. Zwar lässt sich mit ihnen beschreiben, was passiert ist und was passieren könnte – doch sie liefern keine Erklärung dafür, warum etwas passiert ist:

1. Deskriptive Analytik: Was ist passiert?

Sie fasst historische Daten zusammen, um Einblicke in vergangene Ereignisse, Produktionszahlen, Lagerbestände oder Durchschnitte zu gewinnen.

Beispiele: Analyse der Ausschussraten der letzten Monate, Identifizierung von Produktionsspitzen oder saisonalen Trends in der Produktion.

2. Prädiktive Analytik: Was wird passieren?

Sie nutzt historische Daten, statistische Modelle und maschinelles Lernen, um mögliche zukünftige Ergebnisse oder Probleme vorherzusagen – auf Basis eventuell belangloser Korrelationen.

Beispiele: Vorhersage von Maschinenausfällen, Prognose von Wartungsbedarf, Antizipation von Qualitätsabweichungen.

Hypothesen über zukünftige Entwicklungen helfen uns allerdings nicht dabei, wenn wir Einfluss nehmen und bestimmte Ergebnisse bewusst herbeiführen oder vermeiden möchten.

Diese Methoden basieren auf statistischen Korrelationen, deren Aussagekraft in komplexen Produktionsumgebungen begrenzt ist. Ohne den kausalen Kontext können Fehlentscheidungen getroffen und Symptome mit Ursachen verwechselt werden. Dies führt dazu, dass Chancen zur Effizienzsteigerung und genaueren Fehlererkennung in der Produktion verpasst werden.

3. Causal Discovery: Warum passiert es?

Um Produktionsprozesse gezielt zu verbessern, braucht es ein gutes Verständnis dafür, welche Ursachen zu bestimmten Problemen führen. Hier kommt „Causal Discovery“ ins Spiel – das bedeutet, dass moderne Datenanalysetools automatisch und mithilfe von Algorithmen nach Auslösern für Qualitäts- oder Effizienzprobleme suchen, selbst wenn die Produktionsumgebung sehr komplex ist. Anders als herkömmliche Methoden funktioniert Causal Discovery ohne festgelegte Annahmen, sondern entdeckt bisher verborgene Zusammenhänge in den Daten und liefert daraus konkrete Vorschläge für Verbesserungen. Zwar gilt ein Zusammenhang erst dann als endgültig bewiesen, wenn er in Experimenten – etwa wie in medizinischen Studien – bestätigt wird. Doch gerade in der Industrie sind solche aufwendigen Tests kaum umsetzbar, weil die Anlagen zu komplex sind. Außerdem kann in einem Experiment immer nur eine einzelne Vermutung getestet werden.

Damit Methoden der Causal AI aus Beobachtungsdaten belastbare Ergebnisse liefern können, muss der gesamte Kontext berücksichtigt werden. Die systematische Identifikation von Störgrößen (Confoundern) und valider Kausalzusammenhänge erfordert eine ganzheitliche Abbildung des oft hochkomplexen Produktionsumfelds – von Maschinendaten über Bedienereingriffe bis hin zu Umwelteinflüssen. Genau hierfür wurde die patentierte ObjectAnalytics-Technologie entwickelt: Sie kombiniert domänenspezifische Datenmodellierung mit moderner kausaler Analyse.

Objektzentrierte Datenhaltung bietet 360° Blick auf das gefertigte Teil

Im Unterschied zur klassischen Datenhaltung in relationalen Datenbanken – bei der Informationen tabellarisch gespeichert und mit der Abfragesprache SQL verwaltet werden – setzt ObjectAnalytics auf einen objektzentrierten

Ansatz. Dabei werden Produkte, Maschinen oder Prozesse nicht einfach als einzelne Werte in Tabellen abgelegt, sondern als eigenständige Objekte mit allen dazugehörigen Daten modelliert. Im Mittelpunkt steht dabei ein bestimmtes „Analyseobjekt“, wie zum Beispiel eine Maschine oder ein Bauteil, dem alle wichtigen Informationen wie Prozessschritte, Messwerte oder Designdaten zugeordnet werden.

Die ObjectAnalytics-Engine analysiert automatisch die vielen Millionen von Merkmalen, die über alle Produktionsschritte und Ebenen hinweg anfallen – etwa ob zwei Stunden vor einem Fehler die Temperatur gestiegen ist oder ob beim Schichtwechsel besondere Vibrationen aufgetreten sind. So wird eine echte, tiefgehende Ursachenanalyse möglich – und das automatisiert, skalierbar und im jeweiligen Kontext der Produktion.

Praxisbeispiel Elektronikproduktion: Prozessübergreifende Analyse aller Produktionsschritte

Causal AI eröffnet neue Perspektiven für Qualität und Effizienz in der Fertigung. Ein anschauliches Beispiel dafür ist das Siemens-Werk in Erlangen: In einem ersten Pilotprojekt konnte dort die Fehlerquote beim Bestücken von Leiterplatten – das sind die zentralen Bauteile elektronischer Geräte – auf ein extrem niedriges Niveau gedrückt werden, das als „5-Sigma-Marke“ bekannt ist. Das zeigt, wie eine smarte Analyse der Daten hilft, Produktionsfehler gezielt zu finden und so eine fast fehlerfreie Fertigung zu ermöglichen.

Herausforderung in der Elektronikfertigung

Das Siemens-Werk in Erlangen, ein Vorzeigestandort für digitale Transformation, produziert hochpräzise Antriebe für die Industrieautomatisierung. Herzstück dieser Systeme sind individuell entwickelte Leiterplatten. Trotz stabiler Prozesse konnte die geforderte Qualität (weniger als 3,4 Fehler pro Million) lange nicht durchgängig erreicht werden. Die Ursache: eine extrem komplexe Datenlandschaft entlang der Produktionskette – mit täglich rund 500 Millionen erfassten Datenpunkten.

Die bisher eingesetzten Verfahren zur Qualitätsanalyse waren überwiegend deskriptiv oder prädiktiv – sie sagten, was passiert, aber nicht warum. Eine ganzheitliche, ursachenbasierte



Dr. Michael Haft

Michael Haft ist CEO und Gründer von Xplain Data GmbH. Er verbindet Expertise in Theoretischer Physik und Neuroinformatik mit über 20 Jahren Erfahrung in Analysetechnologien bei Siemens, Accenture und SAP. Als früherer Chief Architect (Big Data Analytics) bei SAP und Mitgründer eines Analytics-Start-ups verantwortete er den Produktlebenszyklus datengetriebener Lösungen. Sein Wissen reicht von Datenbanktechnologien und BI über Statistik bis zu Machine Learning – stets mit Fokus auf den geschäftlichen Nutzen.

Kontakt

michael.haft@
xplain-data.com
www.xplain-data.com

Analyse war bislang kaum möglich und mit sehr hohem Aufwand verbunden.

Paradigmenwechsel durch Causal AI

Hier setzt Causal AI an – eine neue Generation Künstlicher Intelligenz, die nicht nur weitestgehend unwichtige Zusammenhänge erkennt, sondern automatisiert kausale Ursachen identifiziert.

Siemens implementierte die Xplain Data Technologie im Rahmen eines Projektes und strukturierte alle Daten entlang der zentralen Analyse-Einheit: dem Objekt Leiterplatte.

„Durch die Implementierung des ganzheitlichen ObjectAnalytics-Datenmodells, basierend auf einem Objektbaum, sind wir erstmals in der Lage, Quality-in-Process- und Quality-in-Design-Effekte gleichzeitig und ganzheitlich auszuwerten. Das bedeutet für uns einen Durchbruch in der Art und Weise, wie wir Produktionsqualität verbessern können“, fasst Erik Schwulera zusammen.

In der PCBA-Fertigung wurde jede bestückte Leiterplatte als zentrales „Objekt“ (Wurzelobjekt) modelliert mit explizierter Ausweisung der Entität „Komponente“, da sich diese bei vielen Betrachtungen als wesentlicher herausstellte als das Board als Ganzes. Die ObjectAnalytics Plattform erfasst pro Leiterplatte alle relevanten Produktionsdaten – vom Lotpastendruck über das Platzieren und Löten der Komponenten bis hin zur automatischen optischen Inspektion (AOI). Dabei wird auch jede einzelne der bis zu 1.500 Komponenten auf einer Platine als „Subobjekt“ berücksichtigt.

Das Besondere: Durch die objektzentrierte Modellierung lassen sich Abhängigkeiten und Fehlerursachen analysieren, die bisher verborgen blieben – etwa bestimmte Kombinationen aus Designparametern und Lotpastenauftrag, die nur in seltenen Fällen zu Defekten führen.

Dank Causal AI konnte Siemens erstmals in der Elektronikproduktion systematisch erkennen, welche Ursachen bestimmten Fehlern zugrunde lagen – und das frühzeitig im Prozess. Fehler, die zuvor in der Endprüfung (AOI) entdeckt wurden, ließen sich plötzlich bis in Designentscheidungen oder Druckfehler in der Lötpaste zurückverfolgen. Diese Erkenntnisse führten zu gezielten Prozessoptimierungen und signifikant verbesserter Produktqualität.

Die Einführung erfolgte in drei Schritten:

- Objektzentrierte Datenintegration in ObjectAnalytics,

- Ursachenanalyse mittels Causal AI Algorithmen
- laufende Prozessoptimierung

Das Ergebnis: Der Durchbruch durch die „5-Sigma-Wand“ – eine Qualität, die zuvor nur mit extremem Aufwand erreichbar war.

Ohne den kausalen Kontext können Fehlentscheidungen getroffen und Symptome mit Ursachen verwechselt werden.

Praxisbeispiel: Root Cause Analysis in der diskreten Fertigung

Das Beispiel aus der PCBA-Fertigung zeigt deutlich das Potenzial von Causal AI bei der Identifizierung tieferliegender Ursachen in komplexen Prozessen. Die Anwendungsmöglichkeiten dieser Technologie gehen jedoch weit über die Leiterplattenproduktion hinaus. Auch in der diskreten Fertigung, beispielsweise in der Montage- oder Schweißtechnik, kann Causal AI entscheidende Mehrwerte liefern.

Ein Qualitätsrückgang in einer automatisierten Montage- und Schweißlinie wirft beispielsweise die Frage auf: Was ist die Ursache? Während klassische Machine-Learning-Modelle Symptome wie Maßabweichungen oder Drehmomentprobleme identifizieren, erkennt Causal AI, dass unzureichende Mitarbeiterschulungen und fehlerhafte Maschineneinstellungen ursächlich verantwortlich sind. Auf Basis dieser Erkenntnisse können gezielte Maßnahmen wie Schulungen oder Kalibrierungsprotokolle eingeleitet werden.

Vorteile von Causal AI in der industriellen Praxis:

- Echte Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge

erkennen

- Automatisierte Ursachenanalyse (RCA)
- Frühzeitige Identifikation von Störungen und Fehlern
- Kontinuierliche Qualitätsüberwachung
- Reduktion von Stillstand, Ausschuss und Nacharbeit
- Kontextbasierte Eingriffe zur Prozessverbesserung

Der Causal DiscoveryBot: Ursachenanalyse im Autopilotmodus

Um die Qualitätsarbeit zu automatisieren, kann der autonom arbeitende „Causal Discovery Bot“ zum Einsatz kommen. Er analysiert kontinuierlich Live-Datenströme aus der gesamten Produktionslinie, erkennt neue kausale Muster und warnt frühzeitig bei aufkommenden Problemen – per E-Mail oder Messengerdiensten. Das System funktioniert rund um die Uhr im Hintergrund und unterstützt damit eine proaktive Produktionsüberwachung ohne personelle Engpässe.

Voraussetzungen und Umsetzung

Causal AI eignet sich für Produktionslinien mit diskreter Fertigung, bei denen eine lückenlose Rückverfolgbarkeit der einzelnen Teile gewährleistet ist. Ein typisches Proof-of-Concept-Projekt dauert drei bis sechs Monate, je nach Datenverfügbarkeit. Die Systeme können On-Premise oder cloudbasiert betrieben werden und erfordern nach erfolgreichem Rollout kein dediziertes Data-Science-Team.

Herausforderungen bei der Einführung

Die größte Hürde bleibt die konsistente Erfassung und Verarbeitung der enormen Datenmengen. ObjectAnalytics wurde genau für diesen Zweck entwickelt und erlaubt eine leistungsfähige, objektzentrierte Analyse ohne manuelles Feature Engineering – eine wesentliche Grundlage für den erfolgreichen Einsatz von Causal AI Verfahren.

Fazit: Von reaktiver Analyse zu gezielter Prozesslenkung

Causal AI stellt einen Paradigmenwechsel in der industriellen Datenanalyse dar. Anstatt sich auf Korrelationen zu verlassen, ermöglicht sie ein

tieferes Verständnis der kausalen Zusammenhänge – und damit zielgerichtete Maßnahmen zur Prozessverbesserung. Für produzierende Unternehmen eröffnet sich so ein Weg zu mehr Effizienz, Qualität und Widerstandsfähigkeit in einer zunehmend datengetriebenen Fertigungswelt.

Der aktuelle [Rockwell State of Smart Manufacturing Report 2025](#) zeigt einen deutlichen Anstieg beim Einsatz von Causal AI zur Produktionsoptimierung. Besonders im Fokus steht die KI-gestützte Qualitätskontrolle – bereits zum zweiten Mal in Folge der wichtigste Anwendungsfall in der Fertigung. Rund 50 Prozent der Unternehmen planen, bis 2025 KI/ML zur Verbesserung der Produktqualität einzusetzen – ein klarer Hinweis auf den steigenden Bedarf an Präzision in komplexen Produktionsumgebungen.

Rockwell sieht dabei Causal AI als Schlüsseltechnologie für Unternehmen, die intelligent skalieren wollen. Mit einem Wachstum von 12 Prozent gegenüber dem Vorjahr bei den Investitionen in kausale und generative KI ist der Wandel hin zu intelligenteren, autonomen Fertigungssystemen in vollem Gange. ■

Kurz und Bündig

In der Fertigung werden riesige Datenmengen häufig nur oberflächlich ausgewertet – meist beschreiben klassische Analysen nur, was passiert ist oder was passieren könnte. Causal AI geht einen Schritt weiter: Sie entdeckt verborgene Ursachen für Qualitätsprobleme, liefert konkrete Verbesserungsvorschläge und ermöglicht so gezielte Prozessoptimierungen. Praxisbeispiele zeigen, wie dadurch Fehlerquoten in der Produktion deutlich gesenkt werden können.