

# Performance von Inspektionsanlagen

## Einflussfaktoren bei der automatischen Defektsuche

An der Leistungsfähigkeit von Inspektionsanlagen im Produktionsprozess entzündet sich nicht selten Streit zwischen dem Anwender und dem Lieferanten – was an unterschiedlichen Sichtweisen liegen kann. Die vom Anwender gewünschte Performance hängt nämlich nicht nur alleine von der technischen Leistungsfähigkeit der Inspektionsanlage ab. Dieser Beitrag möchte die maßgeblichen Einflussfaktoren aufzeigen und für eine Prozess-Gesamtsicht sensibilisieren.



Die Prämisse jedes guten Qualitätsmanagements lautet, Fertigungsprozesse zu beherrschen statt fehlerhafte Teile auszusortieren. Die Prozessbeherrschbarkeit hat jedoch ihre praktischen Grenzen, daher sind automatische Inspektionsanlagen in der Endkontrolle oft unumgänglich. Inspektionen sind aber nie perfekt, weder menschliche noch automatische, daher stellt sich immer die Frage nach ihrer Leistungsfähigkeit.

Die originäre Aufgabe einer Endkontrolle ist es, Schlechttteile auszusortieren. Aus Sicht der QS soll der Durchschlupf von Schlechttteilen, die noch zum Kunden gehen, minimal sein. Aus Sicht des Produktionsleiters dagegen soll eine Inspektion möglichst wenig Fehlausschuss generieren. Diese beiden Größen lassen sich über Stich-

proben aus den Gut- und Schlechttteilen bestimmen. Zusammen mit dem Anteil der echten Gutteile und der echten Schlechttteile kann man diese Kennzahlen sinnvoll in einer Vierfeldertafel darstellen (vgl. Abb. 1).

Die finalen Kennzahlen Durchschlupf und Fehlausschuss hängen allerdings nicht alleine von der technischen Leistungsfähigkeit der Inspektionsanlage ab. Vielmehr sind diese Größen getrieben vom Gesamtprozess, der aus dem Produktionsprozess selbst, der Inspektion und der Qualitätsbewertung der Inspektionsergebnisse besteht (vgl. Abb. 1): der Produktionsprozess erzeugt verschiedene Defekte in einer gewissen Häufigkeit, die Inspektion stellt diese Eigenschaften fest und in der Qualitätsbewertung wird entschieden, ob die festgestellten

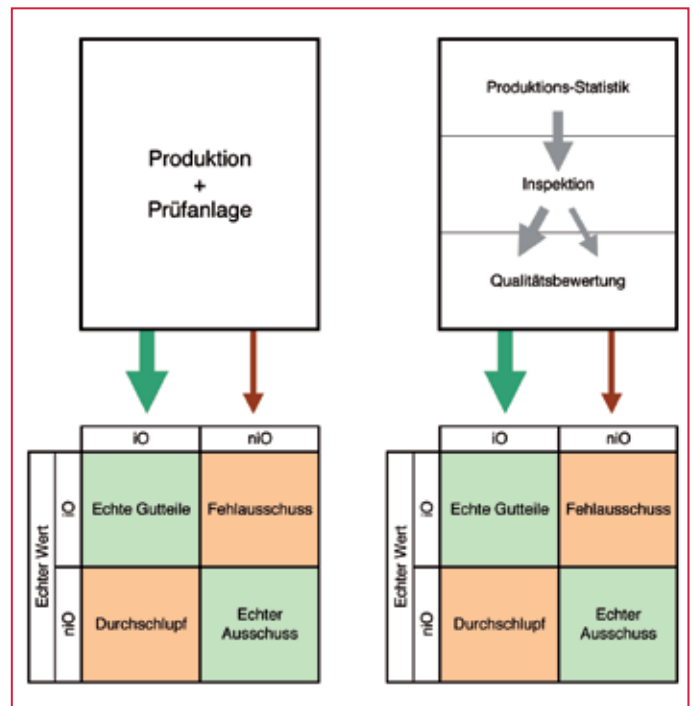


Abb. 1: Aus einer naiven Sicht ist die gesamte Produktion samt Endinspektion eine Blackbox (links), aus der nur korrekt inspizierte Teile (echte Gutteile und echte Schlechttteile) und fehlerhaft inspizierte Teile (Durchschlupf und Fehlausschuss) heraus fallen. Genauer betrachtet ist die Inspektion aber nur ein Glied in einem Gesamtprozess (rechts).

Eigenschaften zu einem Gut- oder Schlechteil führen.

Das Inspektionssystem kann zwar Fehler machen, z.B. in dem es Defekte falsch klassifiziert – wie stark diese Fehler aber zum Tragen kommen hängt davon ab, wie oft die entsprechenden Defekte überhaupt auftreten (Produktions-Statistik). Ob dieser Inspektionsfehler dann überhaupt eine Rolle spielt, hängt wiederum von der nachfolgenden Qualitätsbewertung ab; vielleicht bleibt der gefundene Defekt ja in der gleichen Qualitätsklasse.

Glas kann beispielsweise kleine Blasen und Einschlüsse enthalten, die (auch für einen menschlichen Inspektor) schwer unterscheidbar sind und daher leicht verwechselt werden. Das spielt aber keine Rolle, wenn a) Einschlüsse in der Praxis so gut wie gar nicht vorkommen (Produktions-Statistik) oder wenn b) Blasen und Einschlüsse zur gleichen Produktqualität führen (Qualitätsbewertung).

Hier wird übrigens die Bezeichnung „Defekt“ dem Wort „Fehler“ vorgezogen, das in diesem Kontext für zu viele andere Sachverhalte verwendet werden kann, etwa für Anlagenstörungen, Ursachen von Messungenauigkeiten etc.

## Inspektionsanlagen

Im Folgenden werden speziell Inspektionsanlagen betrachtet, die nach Defekten suchen, also beispielsweise Blasen, Einschlüsse und Kratzer an Glasprodukten oder Beulen und Partikel auf lackierten Blechen. Dafür werden in der Praxis zwar größtenteils optische Systeme eingesetzt, die Betrachtungen gelten aber genauso für jedes andere bildgebende Prinzip, etwa Ultraschall oder Röntgen – übertragen auch für menschliche Sichtprüfer.

Aus physikalischen Gründen existieren „perfekte“ Inspektionsanlagen genauso we-

nig wie perfekte Messinstrumente, denn in jedem realen Messinstrument gibt es Störgrößen wie Rauschen, Drift, Nichtlinearitäten etc. Darüber hinaus können mit Inspektionsanlagen oft nicht die qualitätsrelevanten Defektmerkmale selbst, sondern nur abgeleitete Größen erfasst werden. So wird beispielweise in der Regel angenommen, dass die Helligkeit mit der ein Partikel aufleuchtet proportional seiner Größe sei. Aus diesen prinzipiellen Gründen muss man immer davon ausgehen, dass eine Inspektionsanlage auch Fehler machen kann.

Typischerweise liegt in Inspektionsanlagen eine Signalkette Sensorik + Bildverarbeitung – Detektion – Merkmalsextraktion – Klassifizierung – Qualitätsbewertung vor. Ein Defekt muss erst einmal erkannt, also detektiert werden, bevor er klassifiziert werden kann. Diese Klassifizierung basiert auf der Extraktion von geeigneten Bildmerkmalen. Die nachfolgende Qualitätsentscheidung macht sich an der Klassifizierung, also dem festgestellten Defekttyp fest. Über die Defekttypen fest. Über die Defekttypen hinaus kann eine Inspektionsanlage auch kontinuierliche Merkmale liefern, z.B. die Größe eines Defekts, die ebenfalls in die Qualitätsbewertung eingehen können.

Prinzipiell sollte man die Leistungsfähigkeit einer Inspektionsanlage durch die Messungenauigkeit der Sensorik und die Fehlerfortpflanzung in den nachfolgenden Bildverarbeitungs- und Klassifizierungsschritten beschreiben können, etwa analog zur GUM [1]. Leider sind die entsprechenden Algorithmen oft viel zu komplex für eine solche Vorgehensweise; zudem wäre der Anlagenlieferant genötigt, zentrales Know-how offen zu legen. In der Praxis wird es daher auf empirische Tests hinauslau-

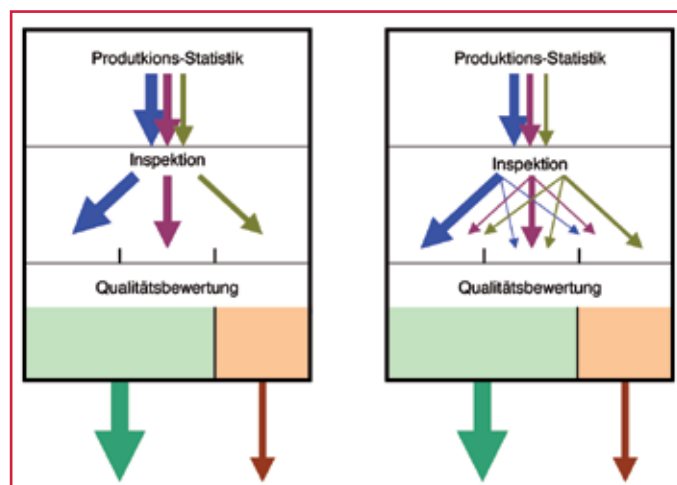


Abb. 2: Idealerweise sollte die Inspektion die Defekte nach ihren Eigenschaften klassifizieren (links), in der Wirklichkeit kommt es aber zu Fehlklassifizierungen (rechts).

fen, bei der die Inspektionsanlage als Blackbox betrachtet werden muss.

In einem solchen Test wird das Inspektionsergebnis mit einer Referenz verglichen, etwa dem Ergebnis einer mikroskopischen Offline-Analyse. Die Verlässlichkeit des Tests steht und fällt mit der Verlässlichkeit dieser Referenz, u.a. was deren Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit angeht. Das ist insbesondere dann zu hinterfragen, wenn es sich um subjektive Einschätzungen von Sichtprüfern handelt. Der Einfachheit wird hier angenommen, dass die Referenz deutlich besser ist als die zu testende Inspektionsanlage.

## Inspektionsfehler

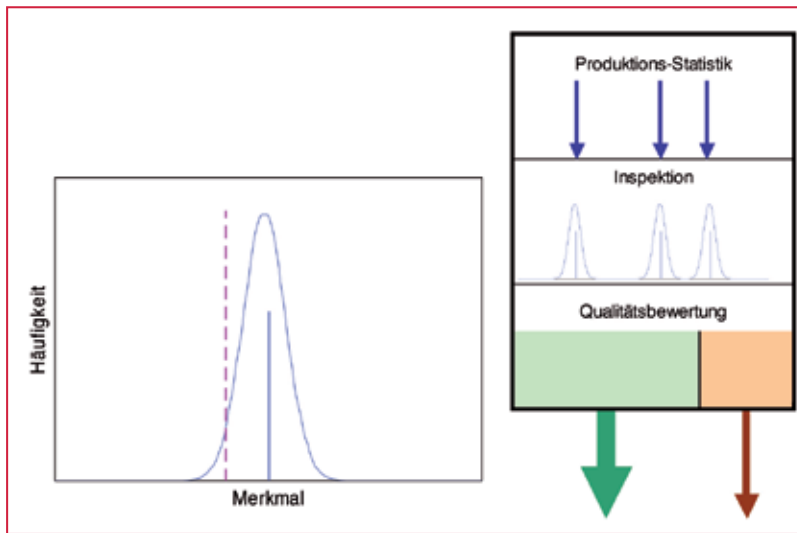
Die Fehler, die eine Inspektionsanlage für kategoriale und kontinuierliche Defektmerkmale machen kann, müssen getrennt betrachtet werden. Für kategoriale Merkmale, etwa die Zuordnung von Defekttypen, kann es zu Fehlklassifizierungen kommen, z.B. wenn ein Defekt des Typs „A“ von der Anlage als Typ „B“ erkannt wird (vgl. Abb. 2). Die entsprechende Leistungsfähigkeit ist durch die Klassifizierungsraten  $p_{ij}$  beschrieben ( $p_{BA}$ : Echter Typ „A“, Inspektionsergebnis Typ „B“). Diese

Klassifizierungsraten erfüllen die Bedingung  $\sum_i p_{ij} = 1$ .

Die Klassifizierungsraten können auch von anderen Parametern abhängen. Speziell ist zu erwarten, dass bei der Klassifizierung von sehr kleinen Defekten eher Fehler auftreten als bei großen Defekten, für die mehr Bildinformationen vorliegen. Für jede kontinuierliche Messgröße lässt sich gemäß der DIN 1319 die systematische und die zufällige Messabweichung (Wiederholpräzision mit Standardabweichung  $\sigma$ ) bestimmen, letztere wird im Allgemeinen als normal verteilt angenommen (vgl. Abb. 3). Darüber hinaus kann man noch Vergleichspräzision, Linearität und Stabilität erfassen.

Aus der beschriebenen Signalkette ergibt sich ein zusätzlicher Einfluss auf die Leistungsfähigkeit durch Detektionsfehler. Das können einerseits nicht detektierte Defekte sein, die unmittelbar zu Durchschlupf führen. Von diesem Detektionsschlupf ist zu erwarten, dass er von der Defektgröße abhängt. Andererseits kann es vorkommen, dass die Inspektionsanlage einen Defekt meldet, obwohl gar keiner vorhanden war. Solche Pseudo-Defekte können durch starkes Kameraräuschen oder kosmische Strahlung erzeugt werden

Abb. 3: Ein realer Messwert weicht im Allgemeinen vom „wahren“ Wert (senkrechter Strich) ab: das kann eine systematische Verschiebung (Abweichung des Mittelwerts vieler Messungen) und zufällige Anteile (Glockenkurve) beinhalten. Daher kann der Messwert manchmal auch jenseits der Toleranzgrenze (gestrichelt) liegen, es kommt zu Fehlausschuss und Durchschlupf.



und führen ggf. zu Fehlausschuss.

Das hier entworfene Bild von Defekt-Inspektionsanlagen ist bewusst stark vereinfacht, um die zentralen Zusammenhänge heraus zu arbeiten. Nicht berücksichtigt wird, dass reale Systeme mehr als zwei Qualitätsklassen haben, produzierte Teile auch mehr als einen Defekt

tragen können und es trainierbare statt parametrierbare Systeme gibt.

### Auswirkungen der Inspektionsfehler

An einem Beispiel zeigt Abbildung 4 wie sich die Klassifizierungsfehler in die Gesamtleistung abbilden. Die beiden Defektypen „A“ und

„B“ seien harmlos („i.O.“) während „C“ aussortiert werden muss. Die Produktionsstatistik sagt aus, wie häufig die Defekte vorkommen und mit diesen Häufigkeiten werden die Klassifizierungsraten  $p_{ij}$  gewichtet. Die resultierenden, gewichteten Klassifizierungsraten werden dann entsprechend der Qualitätsbewertungen in die „i.O.“ und

„n.i.O.“-Klassen zusammengefasst. Daraus resultieren direkt Durchschlupf und Fehlausschuss. Diese Betrachtung bezieht sich nur auf Produkte mit Defekten; für eine praktische Anwendung sind noch defektfreie Produkte einzubeziehen.

Bei einer idealen Inspektionsanlage wären alle Diagonalwerte der Matrix der Klassifizierungsraten  $p_{ii} = 100\%$ , alle Werte außerhalb der Diagonalen = 0. Im Diagramm der Abbildung 4 lässt sich nachvollziehen, dass dann auch kein Durchschlupf und kein Fehlausschuss auftreten würden.

Kontinuierliche Defektmerkmale sind in den meisten Fällen einseitig begrenzt, insbesondere wenn eine obere Toleranzgrenze für eine Defektgröße vorgegeben ist. Je näher der Messwert an dieser Toleranzgrenze liegt, desto größer sind die Auswirkungen der Messunsicherheit. Desto wahrscheinlicher wird es dann, dass aus dieser Messung eine falsche Qualitätsbewertung folgt. Im Extremfall wird ein Defekt, der genau auf der Toleranzgrenze liegt, selbst von einer perfekten Inspektion immer zu 50% als i.O. und 50% als n.i.O. eingeordnet.

Das Gesagte gilt für einen einzelnen Messwert, generell muss man aber alle vorkommenden Werte berücksichtigen, d.h. die Produktionsstatistik einbeziehen. Mathematisch gesprochen muss die Produktions-Statistik mit der Messunsicherheit gefaltet werden (vgl. Abb. 5).

Nicht detektierte Defekte (Detektionsschlupf) werden von der Inspektionsanlage weder klassifiziert noch vermessen und landen daher direkt beim Kunden. Der dadurch verursachte Durchschlupf entspricht dem Produkt aus der Detektionsschlupfrate und dem Anteil an „n.i.O.“-Defekten in der Produktions-Statistik. Ganz analog hängt der Beitrag von

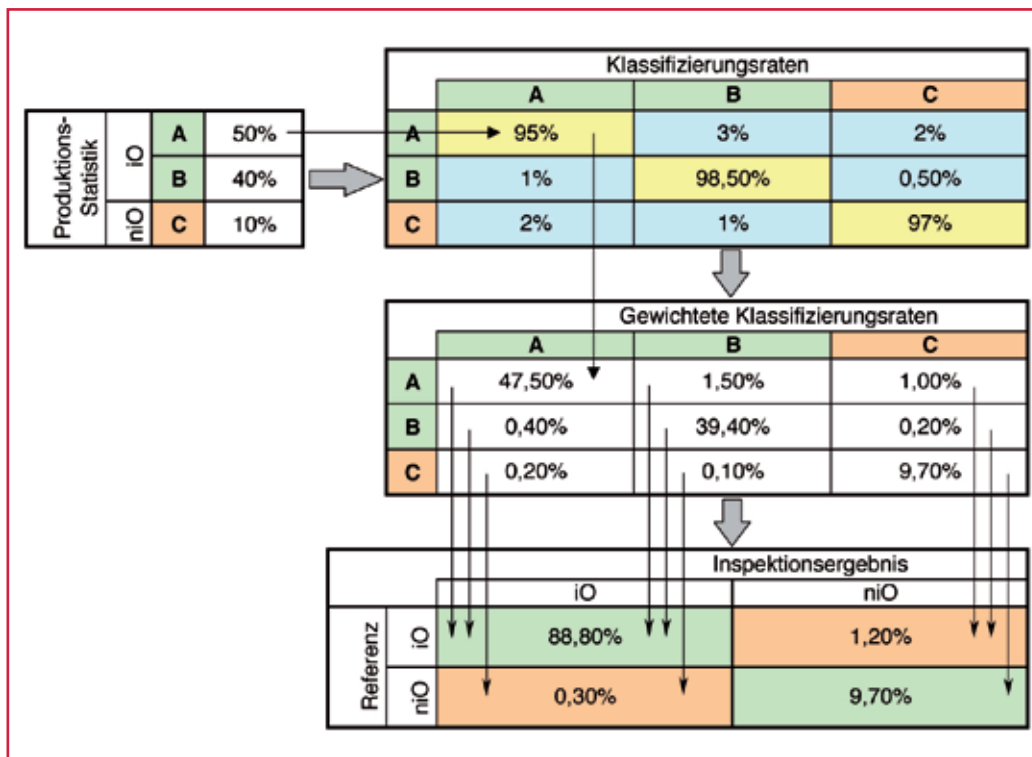


Abb. 4: Auswirkung von Klassifizierungsfehlern: aus den Defekthäufigkeiten (Produktions-Statistik) und den Klassifizierungsraten ergeben sich die gewichteten Klassifizierungsraten (statistische Häufigkeit der Inspektionsergebnisse). Diese werden gemäß den Regeln der Qualitätsbewertung zusammengefasst; im Vergleich zu den wahren Defektypen (Referenz) ergeben sich daraus Durchschlupf und Fehlausschuss.

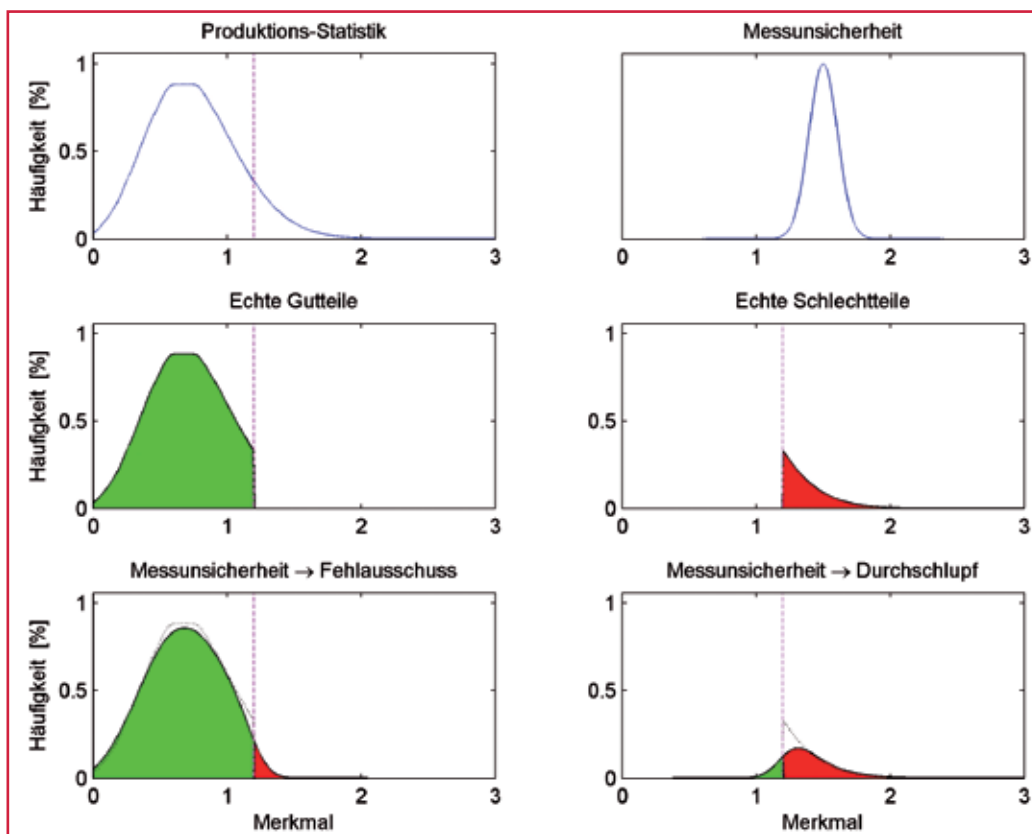


Abb. 5: Auswirkung der Messunsicherheit auf Durchschlupf und Fehlausschuss: links oben ist die Produktions-Statistik gezeigt, rechts oben die Messunsicherheit. An der Toleranzgrenze teilt sich die Produktions-Statistik in Gutteile und Schlechteile (Mitte). Bezieht man die Messunsicherheit mit ein, dann verwaschen diese Verteilungen und ein Anteil landet jeweils jenseits der Toleranzgrenze als Durchschlupf oder Fehlausschuss (unten).

Pseudo-Defekten zum Fehlausschuss davon ab, ob sie als „i.O.“ oder „n.i.O.“ bewertet werden.

### „Messmittelfähige“ Inspektionsanlagen?

Messmittelfähigkeit ist ein bekanntes Qualifizierungsverfahren für Messgeräte und es wird immer wieder die Frage gestellt, ob man Inspektionsanlagen nicht genauso einfach qualifizieren kann. Ein genauere Blick auf das Verfahren zeigt die Probleme auf: Eine Messmittelfähigkeit bezieht sich auf eine kontinuierliche Messgröße und setzt die Genauigkeit des Messmittels in Bezug zu einer oberen und unteren Toleranzgrenze, um sicher zu stellen, dass der Fehlausschuss eine gewisse Grenze nicht übersteigt. Das Verfahren bewertet nur die Unsicherheit, die das Messmittel einbringt und bezieht dabei die Qualitätsbewertung in Form der Toleranzgrenzen mit ein. Durch

Verwendung eines Messnormals wird davon ausgegangen, dass der wahre Wert der Messgröße in der Mitte des Toleranzbandes liegt [2].

Von einem stabilen Fertigungsprozess kann berechtigterweise erwartet werden, dass der Erwartungswert der Messgröße immer dem Sollwert entspricht. Dann, und nur dann, entspricht die Produktions-Statistik der Situation bei der Messmittelfähigkeitsprüfung. Der Produktionsprozess muss aber nicht stabil sein: Fehlausschuss und Durchschlupf können sehr groß werden, wenn die Fertigung aus dem Ruder läuft und Teile an einer der Toleranzgrenzen gefertigt werden. Ein Messgerät, das messmittelfähig ist, stellt also keine Gewähr gegen Fehlausschuss und Durchschlupf dar – was aber die implizite Erwartungshaltung vieler Anwender ist.

Defektmerkmale haben im Allgemeinen keine sinnvollen

festen Erwartungswerte; ohne Informationen über die Produktions-Statistik lässt sich daher keine „Inspektionsmittelfähigkeit“ qualifizieren. Zudem muss das Verfahren auf kategoriale Merkmale übertragen werden. Selbst kontinuierliche Defektmerkmale, namentlich die Defektgröße, sind zumeist mit einer oberen Toleranzgrenze nur einseitig begrenzt. Auch darauf ist das Standardverfahren für die Messmittelfähigkeit nicht unmittelbar übertragbar.

### Fazit

Die Gesamtperformance im Sinne von Fehlausschuss und Durchschlupf hängt gleichermaßen von der Produktions-Statistik, der technischen Leistung der Inspektionsanlage und den angelegten Qualitätskriterien ab. Deshalb kann eine Inspektionsanlage nicht losgelöst von den beiden anderen entworfen, parametrisiert oder gar validiert werden. Gleichzeitig bedeutet diese Abhängigkeit auch, dass jede Änderung am Produktionsprozess oder an den Qualitätskriterien auf die Gesamtperformance durchschlagen kann.

Jede Defekt-Inspektionsanlage ist sehr individuell, dennoch kommen die Schritte Detektion, Typenklassifizierung und Messung kontinuierlicher Größen immer wieder vor. Die jeweiligen Unzulänglichkeiten von Inspektionsanlagen lassen sich genau definieren und daraus die Auswirkung auf die Gesamtperformance ableiten. Auf diesen Elementen kann eine individuelle Anlagenvalidierung aufbauen.

### Literatur

- [1] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements, DIN V ENV 13005
- [2] E. Dietrich, A. Schulze, S. Conrad: Eignungsnachweis von Messsystemen, Hanser Verlag, 2008

► **Autor**  
Dr. Ralph Neubecker, Projektleiter Sondermesstechnik

► **Kontakt**  
Schott AG, Mainz  
Tel.: 06131/66-0  
Fax: 06131/66-2000  
ralph.neubecker@schott.com  
www.schott.com

