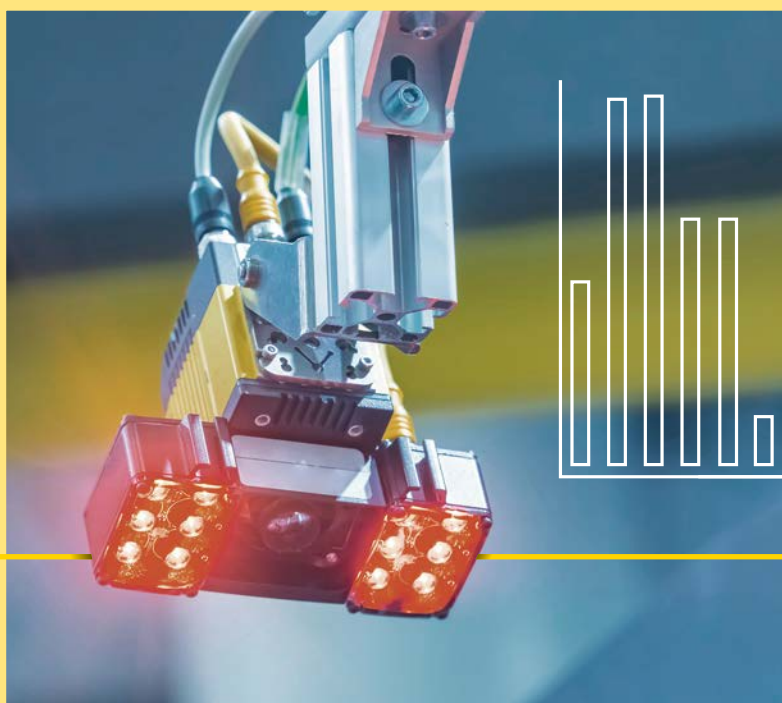


Stephan Conrad
Tobias Müller

Attributive Prüfprozesse in der Produktion



HANSER

Disclaimer zur Barrierefreiheit

Der Carl Hanser Verlag unternimmt große Anstrengungen, um seine Produkte barrierefrei zu machen. Dazu gehört auch, dass Bilder oder Tabellen für blinde und sehbehinderte Menschen zugänglich gemacht werden. Dies geschieht durch zusätzliche beschreibende Texte (Alternativtexte), die in den Daten integriert sind. Die Alternativtexte können von assistiven Technologien (z. B. Screenreadern) vorgelesen werden. Bei der Erstellung dieser Texte kommt eine KI zum Einsatz. Die inhaltliche Verantwortung liegt weiterhin bei den Lektor:innen und Autor:innen.

Conrad/Müller
Attributive Prüfprozesse in der Produktion



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Stephan Conrad
Tobias Müller

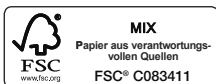
Attributive Prüfprozesse in der Produktion

HANSER

Über die Autoren:

Stephan Conrad, Birkenau

Dr.-Ing. Tobias Müller, Würselen



Print-ISBN: 978-3-446-48271-5

E-Book-ISBN: 978-3-446-48438-2

Die allgemein verwendeten Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke des Text und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

© 2026 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

Vilshofener Straße 10 | 81679 München | info@hanser.de

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Julia Stepp

Herstellung: Melanie Zinsler

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: © stock.adobe.com/xiaoliangge

Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten

Druck: CPI Books GmbH, Leck

Printed in Germany

Inhalt

1	Attributive Prüfprozesse als Bestandteil der Produktion	1
1.1	Besonderheiten von attributiven Prüfprozessen	10
1.2	Erfolgreiche Durchführung attributiver Prüfungen	11
1.3	Optische attributive Prüfungen	13
1.3.1	Sichtprüfungen	14
1.3.2	Optische Systeme	16
1.3.3	Gegenüberstellung von Sichtprüfung und optischen Systemen	17
1.4	Beschaffung von attributiven Prüfmitteln	19
2	Statistische Grundlagen	23
2.1	Vorbemerkung	24
2.2	Attributive Verteilungen	29
2.2.1	Hypergeometrische Verteilung	32
2.2.2	Binomialverteilung	41
2.2.3	Poissonverteilung	44
2.3	Vertrauensbereiche und Zufallsstrebereiche	46
2.3.1	Definition des Vertrauensbereichs	46
2.3.2	Definition des Zufallsstrebereichs	52
2.3.3	Vertrauens- und Zufallsstrebereiche der Binomialverteilung	57
2.3.4	Vertrauens- und Zufallsstrebereiche der Poissonverteilung	65
2.4	Anwendungsempfehlungen	70

3	Diskrete und diskretisierte Prüfprozesse	73
3.1	Einführung und Übersicht zu Skalen.....	73
3.2	Unterschiede zwischen diskretisierten und rein diskreten Prüfprozessen	77
3.2.1	Diskrete Merkmale	79
3.2.2	Diskretisierte Merkmale	79
4	Eignung von attributiven Prüfprozessen	83
4.1	Einführung	84
4.2	Prüflos und Referenzlos	87
4.2.1	Definitionen	87
4.2.2	Anforderungen an das Prüflos als Grundlage des attributiven Eignungsnachweises.....	88
4.2.3	Anforderungen an das Referenzlos.....	89
4.3	Methoden zum Eignungsnachweis von Prüfprozessen für diskretisierte Merkmale	90
4.3.1	Einführung	90
4.3.2	Signalerkennung	90
4.3.2.1	Beschreibung.....	90
4.3.2.2	Durchführung.....	91
4.3.2.3	Analyse	92
4.3.2.4	Kennwert	98
4.3.3	Analytische Methode	101
4.3.3.1	Beschreibung.....	101
4.3.3.2	Durchführung.....	101
4.3.3.3	Analyse	102
4.3.3.4	Kennwert	104
4.3.3.5	Anmerkungen.....	107
4.4	Methoden für diskrete und diskretisierte Merkmale.....	109
4.4.1	Short Method	109
4.4.1.1	Beschreibung.....	109
4.4.1.2	Durchführung.....	110
4.4.1.3	Analyse	111
4.4.1.4	Kennwert	112
4.4.1.5	Anmerkungen.....	112

4.4.2	Effektivität.....	114
4.4.2.1	Beschreibung.....	114
4.4.2.2	Durchführung.....	114
4.4.2.3	Analyse.....	115
4.4.2.4	Kennwert.....	115
4.4.2.5	Anmerkungen.....	118
4.4.3	Miss Rate.....	118
4.4.3.1	Beschreibung.....	118
4.4.3.2	Durchführung.....	118
4.4.3.3	Analyse.....	119
4.4.3.4	Kennwert.....	119
4.4.3.5	Anmerkungen.....	121
4.4.4	False Alarm Rate.....	121
4.4.4.1	Beschreibung.....	121
4.4.4.2	Durchführung.....	122
4.4.4.3	Analyse.....	122
4.4.4.4	Kennwert.....	122
4.4.4.5	Anmerkungen.....	123
4.4.5	Cohens Kappa.....	123
4.4.5.1	Beschreibung.....	123
4.4.5.2	Durchführung.....	124
4.4.5.3	Analyse.....	125
4.4.5.4	Kennwert.....	128
4.4.6	Fleiss' Kappa.....	128
4.4.6.1	Beschreibung.....	128
4.4.6.2	Durchführung.....	130
4.4.6.3	Analyse.....	130
4.4.6.4	Kennwert.....	130
4.4.6.5	Anmerkungen.....	131
4.4.7	Kendalls Konkordanz-Koeffizient.....	137
4.4.7.1	Beschreibung.....	137
4.4.7.2	Durchführung.....	138
4.4.7.3	Analyse.....	138
4.4.7.4	Kennwert.....	139

- 4.4.8 Bowker-Test. 140
 - 4.4.8.1 Beschreibung. 140
 - 4.4.8.2 Durchführung. 140
 - 4.4.8.3 Analyse 140
 - 4.4.8.4 Kennwert 141
 - 4.4.8.5 Anmerkungen 145
- 4.5 Auswahlhilfen 145
- 4.6 Eignungsnachweis bei der Nutzung von künstlicher Intelligenz 149
- 5 Künstliche Intelligenz, Machine Learning und Deep Learning in attributiven Prüfprozessen 157**
 - 5.1 Überwachte Lernalgorithmen 165
 - 5.2 Trustworthy AI and Explainable AI 171
 - 5.2.1 Vertrauenswürdige Machine Learning-Algorithmen 172
 - 5.2.2 Erklärbare Machine Learning-Algorithmen 180
 - 5.2.3 Zwischenfazit zu Trustworthy AI und Explainable AI 193
 - 5.3 Erklären vs. Verstehen. 193
 - 5.4 Hinweise für die Praxis 194
 - 5.5 Ausblick. 196
- Index 205**

1

Attributive Prüfprozesse als Bestandteil der Produktion

In der heutigen, schnelllebigen Produktionswelt spielen Qualitätssicherung und Qualitätsmanagement eine entscheidende Rolle für den Unternehmenserfolg. In einer Zeit, in der Märkte und Wettbewerb immer kompetitiver werden, ist es für Unternehmen von größter Bedeutung, Produkte von höchster Qualität zu liefern, um sich von günstigeren Anbietern abzuheben. Dies gilt insbesondere für Unternehmen, die sich über eine Qualitätsführerschaft auf dem Markt behaupten wollen und für die eine Preisführerschaft zum Beispiel aufgrund hoher Lohnkosten nicht umsetzbar oder aufgrund der Unternehmensphilosophie auch nicht erstrebenswert ist. Eine herausragende Produktqualität kann nicht nur dazu beitragen, Kunden zufriedenzustellen und langfristige Kundenbeziehungen aufzubauen, sondern auch das Unternehmensimage stärken und neue Marktanteile gewinnen.

Ein zentrales Element bei der Sicherstellung, Regelung und Optimierung der Qualität ist die Fertigungsmesstechnik. Diese spielt eine wesentliche Rolle in modernen Produktionsprozessen, da sie Messdaten liefert, die zur Überwachung und Steuerung der Produktqualität verwendet werden können. Durch den Einsatz fortschrittlicher Technologien der Messtechnik und (Mess-)Datenverarbeitung können Unternehmen sicherstellen, dass ihre Produkte den festgelegten Spezifikationen entsprechen und höchste Standards erfüllen. Darüber hinaus schafft die Fertigungsmesstechnik eine fundierte Datengrundlage und bildet somit die Basis für diverse Entscheidungsprozesse in Unternehmen. Diese Daten sind nicht nur essenziell für die kontinuierliche Verbesserung der Produktionsprozesse, sondern auch für strategische Entscheidungen im Hinblick auf Produktentwicklung und -innovation.

Die Fertigungsmesstechnik steht in diesem Zusammenhang für die mit dem Messen und Prüfen verbundenen Tätigkeiten von industriell hergestellten Produkten (Pfeifer/Schmitt 2010). Attributive Prüfprozesse stellen hierbei einen Teilbereich der Fertigungsmesstechnik dar, welcher insbesondere mit dem Aufstreben von kostengünstiger optischer Messtechnik und Machine Vision-Algorithmen an Bedeutung gewonnen hat.

**Machine Vision**

„Anwendung von Computer Vision auf Maschinen, Roboter, Prozesse oder Qualitätskontrolle.“

Anmerkung 1: Diese Definition gilt auch für die Verwendung in optischen Elementen und Bauteilen.“

(ISO/TR 14997-2, 2022; übersetzt aus dem Englischen)

Doch was bedeutet diese Definition für die Praxis?

**Übersetzung für die Praxis**

Machine Vision-Systeme erfassen Bilder eines Produkts oder Bauteils und wenden Bildverarbeitungsroutinen an, um auf Basis dieser Bilder die Qualitätsmerkmale des Produkts zu extrahieren und zu bewerten. Durch die Flexibilität, die geringen Anschaffungskosten und eine kontaktlose Messung/Qualitätsbewertung sind Machine Vision-Systeme eine attraktive Wahl für automatisierte Qualitätskontrollen und -regelungen (Wolfschläger 2024).

Im Gegensatz zu Messungen, welche für einen Prüfscheid herangezogen werden (z. B. um über Messwerte Längen, Breiten oder Gewichte zu bewerten), klassieren attributive Prüfprozesse. Attributive Prüfprozesse bilden den Kern dieses Buches, deshalb sollen sie, ebenso wie der Begriff Klassieren, zunächst definiert werden. Für den Begriff Klassieren gibt es eine feststehende Definition, zum Beispiel nach VDA-Band 5.3 (VDA QMC 2024).

**Klassierung**

Bei der Klassierung handelt es sich um die Zuordnung einer Eigenschaft eines Objekts zu einer zuvor definierten Klasse (VDA QMC 2024).

Klassierung ist das Zuordnen von Elementen zu den zuvor bestimmten Klassen, basierend auf ihren Merkmalen und den festgelegten Klassifizierungsregeln.

Klassifizierung bezeichnet hingegen das Bilden von Klassen durch das Festlegen gemeinsamer Merkmale.

Ein Prüfprozess selbst besteht immer aus drei Aspekten – dem Prüfmittel, dem Prüfmerkmal und den Einsatzbedingungen (Bild 1.1).

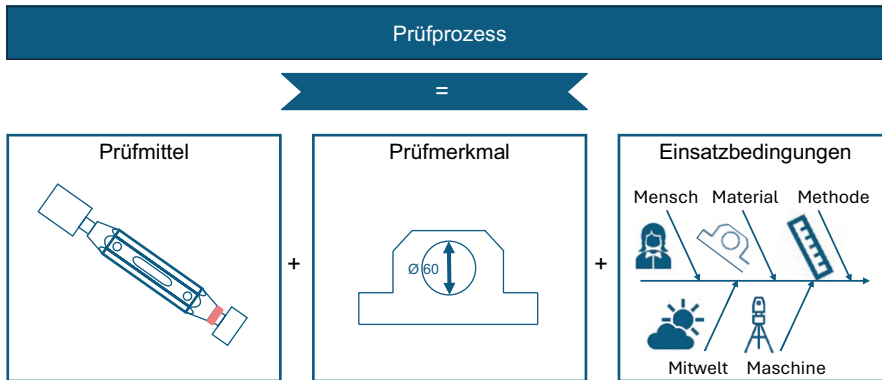


Bild 1.1 Die Bestandteile eines Prüfprozesses

Für den Begriff „attributiver Prüfprozess“ oder „Prüfprozess“ im Allgemeinen gibt es bislang noch keine einheitliche Definition. Für die Nutzung in diesem Buch und für die allgemeine Nutzung des Begriffs wird die im Folgenden aufgeführte Definition analog zum VDA-Band 5 vorgeschlagen.



Prüfprozess

Bei einem Prüfprozess handelt es sich um die Durchführung der Prüfung und die Ermittlung eines Prüfergebnisses durch Abgleich des Ergebnisses eines Messprozesses mit einer vorgegebenen Spezifikation unter Berücksichtigung der ermittelten Messunsicherheit.

Die Situation kann folgendermaßen dargestellt werden (Bild 1.2):

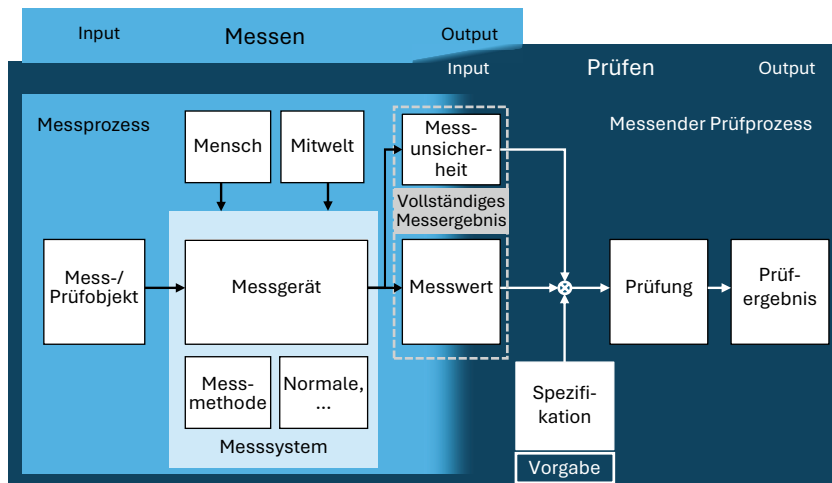


Bild 1.2 Messender Prüfprozess in Anlehnung an VDA-Band 5 (VDA QMC 2021)

Das Messsystem besteht aus Messgerät, Referenzen/Normalen und allen weiteren Messmitteln und Messhilfsmitteln, die für die Durchführung einer Messung notwendig sind. Dazu gehört auch die mit der Art des Messmittels verbundene Messmethode (Zweipunkt-Antastung, Scanning, Absolutmessung, Vergleichsmessung etc.).

Der Messprozess ist das Durchführen der Messung unter den aktuellen Bedingungen zum Zeitpunkt des Messens (z. B. Einflüsse durch die messenden Personen, die Temperatur und der Temperaturgradient, die Luftfeuchte, der Verschmutzungsgrad des Werkstücks etc.).

Der Output des Messprozesses ist das vollständige Messergebnis, das aus Messwert und zugehöriger Messunsicherheit besteht.

Der Prüfprozess greift auf den Messprozess und das vollständige Messergebnis zurück, um einen Prüfscheid durch Abgleich des Ergebnisses eines Messprozesses mit einer vorgegebenen Spezifikation unter Berücksichtigung der ermittelten Messunsicherheit zu fällen.

Somit ist Messen und Prüfen eine Abfolge von Tätigkeiten und nicht, wie oft vermutet, eine diametral gegenüberstehende Vorgehensweise, die oft verkürzt als „Messen mit Messwerten und Prüfen ohne Messwerte“ wiedergegeben wird.

Attributiver Prüfprozess

Einem attributiven Prüfprozess geht kein Messprozess voraus, sondern ein attributiver Bewertungsprozess (Bild 1.3). Das attributive Bewertungssystem umfasst analog zu den vorangegangenen Ausführungen das notwendige Equipment und die prinzipielle Vorgehensweise (z. B. taktil, sensorisch, optisch, mit Lehre, durch Farbvergleich etc.). Der attributive Bewertungsprozess entspricht der Durchführung der Bewertung unter den aktuellen Bedingungen zum Zeitpunkt des Bewertens analog zum Messprozess.

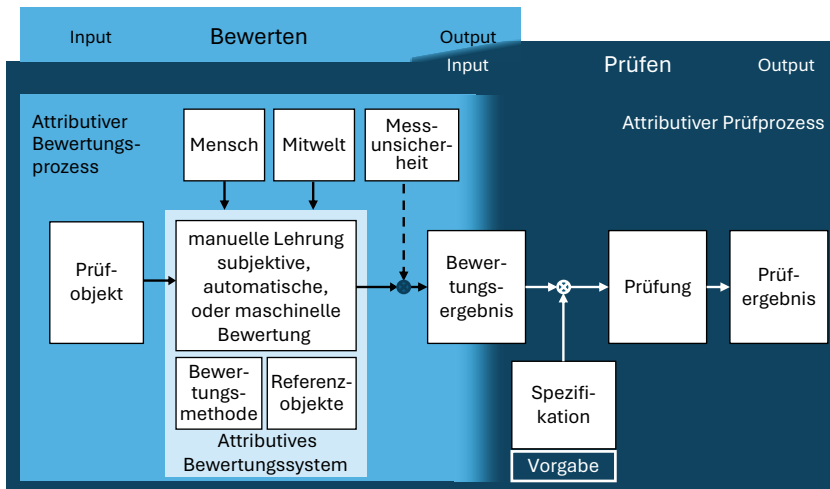


Bild 1.3 Attributiver Prüfprozess in Anlehnung an VDA-Band 5 (VDA QMC 2021)

Der Output des Bewertungsprozesses ist eine simple Feststellung wie „Farbe ist unterschiedlich“, „Grenzlehrdorn gleitet durch die Bohrung“ oder „ein Kratzer ist sichtbar“.

Der Prüfprozess greift auf den Bewertungsprozess und das Bewertungsergebnis zurück, um einen Prüferscheid durch Abgleich des Bewertungsergebnisses mit einer vorgegebenen Spezifikation zu fällen. Dabei ist eine „Bewertungsunsicherheit“ zwar vorhanden, kann aber möglicherweise nicht ermittelt und insbesondere nicht berücksichtigt werden.



Übersetzung für die Praxis

Für das praktische Verständnis ist wichtig, dass sowohl messend als auch attributiv geprüft werden kann. Das Prüfen ist die Ermittlung eines Prüferscheids aufgrund eines Messwertes oder einer Bewertung (Beobachtung).

Beispiele:

- Der Flansch lässt sich in die Gutseite der Rachenlehre einlegen, passt aber nicht in die Schlechtseite. Das Teil ist i. O.
- Der Isolationswiderstand von 2,75 G Ω liegt deutlich über dem Mindestwert von 380 M Ω . Das Teil ist i. O.
- Der Kratzer auf der Glasscheibe ist sichtbar und lässt sich mit einem Fingernagel spüren, liegt aber innerhalb der Falzzone. Laut Spezifikation sind Kratzer mittlerer Intensität in der Falzzone akzeptabel. Das Teil ist i. O.
- Die Flanschdicke von 15,892 mm unterschreitet die obere Toleranzgrenze von 15,900 mm. Das Guard Band auf Basis der bekannten Messunsicherheit beträgt 0,057 mm. Somit lässt sich trotz Messwert innerhalb der Toleranz nicht nachweisen, dass das Teil i. O. ist. Damit wird das Teil als n. i. O. eingestuft und darf nicht ausgeliefert werden.

Der wesentliche Unterschied in der Durchführung der messenden Prüfung und der attributiven Prüfung ist die Nutzung der Messunsicherheit:

- Im messenden Fall entsteht ein vollständiges Messergebnis mit Messunsicherheit, woraus Schutzabstände berechnet werden, die im Prüferscheid berücksichtigt werden müssen.
- Im attributiven Fall ist die Messunsicherheit oder „Bewertungsunsicherheit“ ebenfalls vorhanden und kann auch aufgezeigt werden, allerdings nicht immer als Messunsicherheit in der Dimension eines Messwertes ($U = 0,53 \mu\text{m}$), sondern vielfach nur als Kennwert in einer wahrscheinlichkeitstheoretischen Dimension (z. B. Kappa $\kappa = 0,82$). Damit kann sie im Prüferscheid auch nicht berücksichtigt werden, und es können keine Guard Bands angewandt werden.

Somit spiegelt sich die Unsicherheit im attributive Prüferscheid vollständig wider, während im messenden Fall die Unsicherheit berücksichtigt wird und damit der Prüferscheid abgesichert werden kann.

Attributive Prüfprozesse zielen darauf ab, festzustellen, ob ein Produkt bestimmte Kriterien erfüllt oder nicht.

Dies sind beispielhafte attributive Prüfmerkmale:

- **Farbe:** die Überprüfung, ob ein Produkt in der korrekten Farbe lackiert wurde
- **Oberflächengüte:** die Überprüfung, ob eine Oberfläche Fehlstellen wie Kratzer, Dellen oder sonstige sichtbare Mängel aufweist
- **Form:** Überprüfung auf das Vorhandensein von Verformungen oder strukturellen Anomalien
- **Vollständigkeit:** Sicherstellung, dass alle Teile eines Produkts vorhanden sind (gegebenenfalls inklusive einer Überprüfung der korrekten Montage)

Je nach Anwendungsfall kann es sinnvoller sein, eine Messung für einen Prüfentscheid zu nutzen oder auf die vorangehend beschriebene attributive Prüfung zurückzugreifen. Welche Methode und welche Systeme gewählt werden, ist häufig eine multikriterielle Entscheidung.

Dies sind die Vorteile attributiver Prüfprozesse gegenüber Messungen (mit anschließendem Prüfentscheid):

- **Kosten:** Häufig sind attributive Prüfprozesse im direkten Vergleich der Anwendungsfälle kostengünstiger (insbesondere mit dem vorangehend beschriebenen Aufstreben kostengünstiger optischer Messtechnik, wie z. B. Kameras in Kombination mit Machine Vision-Algorithmen).
- **Geschwindigkeit:** Häufig sind attributive Prüfprozesse schneller und können auch einfacher In-Line verbaut werden.
- **Automatisierungspotenzial:** Mit der Entwicklung von optischer Messtechnik und Machine Vision-Algorithmen lassen sich attributive Prüfprozesse häufig leicht(er) automatisieren. Dies reduziert den Bedarf an menschlicher Intervention und minimiert das Risiko subjektiver Fehlern.
- **Eignung für bestimmte Merkmale:** Einige Produktmerkmale lassen sich besser qualitativ als quantitativ über Messwerte bewerten. Beispielsweise kann die Sichtprüfung auf Kratzer oder Verfärbungen effizienter mit attributiven Methoden durchgeführt werden.

Dies sind die Nachteile attributiver Prüfprozesse gegenüber Messungen (mit anschließendem Prüfentscheid):

- **Begrenzte Informationsmenge:** Da attributive Prüfprozesse nur Aussagen über das Erfüllen oder Nichterfüllen bestimmter Kriterien treffen (z. B. OK/NOK oder die Beschreibung einer Farbe) ist der Informationsgehalt gegenüber einer variablen Prüfung, welche spezifische Messwerte als zusätzliche Informationen mit ausgibt, begrenzt. Die Lage innerhalb (oder außerhalb) der Toleranz wird nicht bestimmt.

- **Eingeschränkte Prozessverbesserung:** Es gibt keine detaillierte Information über das Ausmaß oder die Natur des Problems (z. B. die Lage des Prüfergebnisses zum Sollwert oder der Toleranzgrenzen), was eine Diagnose und Behebung des Qualitätsproblems erschweren kann.
- **Eignungsnachweis:** Verschiedenste Normen und Richtlinien fordern einen Eignungsnachweis für die in der Produktion eingesetzten Prüfprozesse (unabhängig von der Ausprägung, ob attributiv oder messend). Grundlage hierfür bildet häufig die Bestimmung der Messunsicherheit, welche z. B. über den Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) (JCGM 100:2008) oder den VDA-Band 5 (VDA QMC 2024) bestimmt werden kann. Da die Messunsicherheit für attributive Prüfprozesse aber nicht ohne Weiteres quantifiziert werden kann, sind andere Methoden zu nutzen, welche die anwendenden Personen aber häufig vor Herausforderungen stellen. Begründet ist dies entweder darin, dass die notwendigen statistischen Kenntnisse nicht vorliegen oder schlichtweg die Dokumentation von Eignungsnachweisen attributiver Prüfprozesse in Normen und Richtlinien oft nicht im Vordergrund steht. Hinzu kommt, dass optische Messtechnik insbesondere in Kombination mit Machine Vision noch einmal neue Herausforderungen birgt, welche erstmalig im neuen VDA-Band 5.3 adressiert wurden.

Wird die attributive Prüfung über eine Lehre (z. B. einen Lehrdorn oder -ring) durchgeführt, sind nach Dietrich und Conrad folgende Nachteile zu ergänzen (Dietrich/Conrad 2024):

- **Vielseitigkeit:** Lehren sind auf die Überprüfung einer spezifischen Toleranz ausgelegt. Variable Prüfprozesse in Form von Messprozessen können häufig ein breiteres Spektrum an Nennmaßen und Toleranzen prüfen und sind so flexibler einsetzbar.
- **Abnutzung:** Abnutzungserscheinungen können nicht ohne Weiteres über das Nachstellen des Geräts kompensiert werden, was bei Messsystemen häufig möglich ist.



Die Vorteile von variablen Prüfprozessen kommen insbesondere bei kleineren Toleranzen zum Tragen. Daher empfiehlt es sich, Toleranzen der Klasse IT 9 und darunter durch direkte Messungen zu prüfen und lediglich gröbere Toleranzen mit festen Lehren zu kontrollieren. Bei der Prüfung mit Lehren kann beispielsweise die vom Bediener ausgeübte Krafteinwirkung zu hoch sein.

Ziel dieses Buches ist es, einen umfassenden Überblick über attributive Prüfprozesse in der Produktion zu geben und ein einheitliches Verständnis zu schaffen, das im Buch gebündelt wird. Das Buch soll zudem Hilfestellungen für alle Personen liefern, welche attributive Prüfprozesse einsetzen oder planen, diese einzusetzen. Zu Beginn werden zunächst die Besonderheiten von attributiven Prüfprozessen be-

schrieben. Dazu werden sie den messenden Systemen gegenübergestellt (Abschnitt 1.1 ff.). Hierbei wird auch auf die Besonderheiten von optischen attributiven Prüfungen als Spezialfall der attributiven Prüfungen eingegangen. Zudem werden Hilfestellungen für die Beschaffung attributiver Prüfmittel vorgestellt.

In Kapitel 2 werden die statistischen Grundlagen für attributive Prüfprozesse ausführlich dargelegt. Dieses Kapitel umfasst nicht nur die grundlegende Beschreibung der attributiven Verteilungen, sondern beschäftigt sich auch intensiv mit den Vertrauens- und Zufallsstrebereichen, die für das Verständnis und die Anwendung attributiver Prüfprozesse von zentraler Bedeutung sind. Hierbei wird besonderer Wert darauf gelegt, die theoretischen Konzepte verständlich zu vermitteln und ihre Relevanz für die praktische Anwendung zu verdeutlichen. Der Fokus liegt dabei stets auf der praktischen Umsetzung der statistischen Grundlagen, sodass die Leserinnen und Leser die erlernten Prinzipien direkt in ihren Arbeitsalltag integrieren können. Praktische Beispiele und illustrative Darstellungen unterstützen das Verständnis der komplexen Materie und erleichtern die Übertragung auf reale Anwendungsszenarien.

Kapitel 3 beschreibt diskretisierte und diskrete Prüfprozesse. Hierbei werden zunächst beide Arten von attributiven Prüfprozessen definiert und es wird erläutert, wie sich diese hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Anwendungen unterscheiden. Dabei werden die spezifischen Merkmale und Einsatzgebiete der diskretisierten und diskreten Prüfprozesse herausgearbeitet, um ein Verständnis für ihre jeweiligen Vor- und Nachteile zu schaffen. Darüber hinaus werden die Referenz- und Prüfloze behandelt. Es wird erläutert, welche Bedeutung Referenz- und Prüfloze in den Prüfprozessen haben und wie sie korrekt angewendet werden können.

Grundlage für das Vertrauen in die Ergebnisse von (attributiven) Prüfprozessen bildet eine erfolgreich nachgewiesene Prüfprozesseignung. Da der Eignungsnachweis von attributiven Prüfprozessen in den Methoden deutlich von Eignungsnachweisen für messende Systeme abweicht, wird in Kapitel 4 der Eignungsnachweis aufgegriffen. In Kapitel 4 werden verschiedene Methoden für diskretisierte und (rein) diskrete, attributive Prüfprozesse beschrieben. Erstmalig wird nach einer umfassenden Darstellung der verschiedenen Möglichkeiten auch eine Auswahlhilfe zur Verfügung gestellt. Insbesondere für praktische Anwendungen soll hierbei zwischen den Vor- und Nachteilen der verschiedenen Methoden differenziert werden. Über die klare Definition von Grenzen der jeweiligen Methoden soll allen anwendenden Personen ein Leitfaden zur Verfügung gestellt werden, einen Eignungsnachweis eigenständig mit den entsprechenden Methoden durchzuführen. Als Erweiterung wird erläutert, was beim Eignungsnachweis durch die Nutzung von Machine Learning- oder Deep Learning-Algorithmen in Prüfprozessen zu beachten ist und welche Besonderheiten die Nutzung als Auswertalgorithmus bietet.

In Kapitel 5 werden abschließend noch einmal in ganz allgemeiner Weise die Methoden der künstlichen Intelligenz sowie des Machine Learning vorgestellt. Neben den Auswirkungen der neuen Methoden in der Praxis ist der Aspekt der Vertrauenswürdigkeit der Ergebnisse der Algorithmen (zusätzlich zum klassischen Eignungsnachweis) ein

Kernthema. Trustworthy AI (Artificial Intelligence) und Explainable AI stellen hierbei nicht nur Buzzwords in neuerer Literatur und in Bekanntmachungen dar, sondern sind auch Methodenbaukästen, welche genutzt werden können, um die Vertrauenswürdigkeit der Methoden zu bewerten. In Kapitel 5 wird analysiert, welche Methoden aktuell existieren, inwiefern sie jetzt bereits Anwendung in der Praxis finden und welche aktuellen Forschungsergebnisse den zukünftigen Einsatz dieser Methoden im zukünftigen Unternehmensalltag beeinflussen könnten. Darüber hinaus wird eine Analogie zum klassischen Eignungsnachweis aus der Fertigungsmesstechnik gezogen, und entsprechende Grenzen der (aktuellen) Methoden werden aufgezeigt.



Einige Abbildungen in diesem Buch wurden mithilfe der Software Q-DAS solara. MP der Firma Hexagon erstellt. Wir danken dem Unternehmen für die freundliche Bereitstellung der Software.

Das Buch selbst weist verschiedene Strukturelemente auf, um das Ziel des Verständnisses und die Anwendbarkeit in der Praxis zu unterstützen.



Definitionen werden genutzt, um ein einheitliches Verständnis eines Themas oder eines Begriffs herzustellen. Im Bereich der attributiven Prüfungen kann es durchaus zu widersprüchlichen Definitionen kommen. Für das vorliegende Buch gelten die Definitionen aus diesen Kästen. Grundlage hierfür sind in der Regel Normen, Richtlinien oder sonstige Quellen aus der Literatur. In Ausnahmefällen wird eine eigenständige Definition neu erstellt.



Übersetzung für die Praxis

Da Definitionen aus Normen, Richtlinien und Literaturquellen nicht zwingend einfach und verständlich sind, wird in den Kästen mit der Überschrift „Übersetzung für die Praxis“ eine Erklärung ergänzt. Diese Erklärung greift die Definition auf und führt weitere Erklärungen (z. B. Beispiele) an. Wichtig zu beachten ist, dass Definitionen aus Normen und Richtlinien im Anwendungsgebiet des jeweiligen Dokuments allgemeingültig sind. Die Übersetzung für die Praxis stellt die Verständlichkeit über die Allgemeingültigkeit. Die Übersetzung gilt somit für die überwiegende Mehrheit der Anwendungsfälle, ist aber gegebenenfalls nicht auf alle Spezialfälle anwendbar.



Praxistipp

Ein Praxistipp zielt auf die Anwendbarkeit des beschriebenen Abschnitts (z. B. einer Methode) ab. Es werden Hilfestellungen oder zu beachtende Randbedingungen ergänzt, welche so gegebenenfalls nicht in Normen oder Richtlinien stehen. Ziel ist es, Personen aus der Praxis die Anwendbarkeit sowie den Einstieg in die entsprechenden Themen zu erleichtern.

1.1 Besonderheiten von attributiven Prüfprozessen

Um die Besonderheiten von attributiven Prüfprozessen zu verstehen, müssen zunächst die Unterschiede zwischen Prüfen und Messen verstanden werden. Gemäß des Internationalen Wörterbuchs der Metrologie (VIM) definiert sich eine Messung wie im Folgenden aufgeführt.



Messung

„Prozess, bei dem einer oder mehrere Größenwerte, die vernünftigerweise einer Größe zugewiesen werden können, experimentell ermittelt werden“

(JCGM 200:2012, übersetzt aus dem Englischen)



Übersetzung für die Praxis

Eine Messung ist der Prozess, bei dem durch gezielte Experimente oder Beobachtungen der Wert einer Größe oder Eigenschaft festgestellt wird. Dabei werden Messgeräte oder Methoden verwendet, um beispielsweise Länge, Gewicht, Temperatur oder andere relevante Parameter zu bestimmen. Das heißt, mithilfe von technischen Hilfsmitteln werden konkrete Werte erfasst, um Eigenschaften von Produkten, Materialien oder Prozessen zu quantifizieren.

Der VDA-Band 5 definiert die Messung nach VIM als Messprozess, und dieser unterliegt verschiedensten Einflüssen. Diese Einflüsse stammen entweder direkt aus dem Messsystem (Messgerät, Messmethode) oder es handelt sich um Einflüsse aus der Umwelt, von Menschen oder vom Messobjekt. Das Wirken dieser Einflüsse beim Durchführen einer Messung führt dazu, dass das Messergebnis mit einer Unsicherheit, der sogenannten Messunsicherheit, behaftet ist. Die Messunsicherheit wiederum definiert sich nach VIM wie im Folgenden aufgeführt.



Messunsicherheit

„Nichtnegativer Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die der Messgröße auf der Grundlage der benutzten Information beigeordnet ist“

(JCGM 200:2012, übersetzt aus dem Englischen)

Für die Praxis bedeutet das Folgendes:



Übersetzung für die Praxis

Die Messunsicherheit gibt einen Bereich des Messwertes an, in dem der wahre Wert der Messgröße mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegt. Wie groß dieser (Unsicherheits-)Bereich ist, hängt von den wirkenden Einflussgrößen in Kombi-

nation mit dem genutzten Messsystem ab. Große Schwankungen in der Beleuchtung können zum Beispiel einen hohen Einfluss auf die Messunsicherheit eines optischen Messsystems haben. Der Einfluss auf ein taktilen Messsystem würde vermutlich deutlich geringer ausfallen.

Basierend auf Experimenten oder Angaben aus der Literatur kann die Messunsicherheit bestimmt werden. Hierbei handelt es sich jedoch um eine Abschätzung des Unsicherheitsbereichs. Das Ergebnis hängt also davon ab, welche Einflüsse betrachtet werden und welches Modell zur mathematischen Bestimmung der Messunsicherheit genutzt wird. Für die Praxis ist es demnach wichtig, alle relevanten Einflüsse zu betrachten und eine fundierte Entscheidung zur Auswahl des mathematischen Modells zur Quantifizierung der Messunsicherheit zu treffen. Hilfestellungen können hierbei einschlägige Normen und Richtlinien (z. B. GUM, VDA 5, ISO 22514-7) bieten.

Das Ergebnis einer Messung setzt sich immer aus dem Messergebnis, der Messunsicherheit und der physikalischen Einheit der Messgröße zusammen. Es handelt sich also um eine Information, welche gewonnen wird.

Eine Prüfung wiederum ist der Abgleich mit einer Spezifikation. Als klassisches Beispiel der Produktionstechnik sei hier der Konformitätsentscheid nach DIN EN ISO 14253-1 zu nennen. Hierbei wird bewertet, ob ein Werkstück die geforderte Spezifikation erfüllt (i. O.) oder ob das Werkstück die Spezifikation nicht erfüllt (n. i. O.) und somit entweder nachgearbeitet oder verschrottet werden muss. Das Ergebnis einer Prüfung ist nach VDA 5 ein Prüfentscheid. Im Gegensatz zu einer Messung ist eine Prüfung also eine Bewertung vorliegender Informationen.

Prüfungen können folglich Messungen als Grundlage für die Bewertung der Konformität nutzen. Allerdings können diese Informationen nicht nur aus Messungen stammen, sondern auch aus anderen Quellen. Das Nutzen einer Lehre kann ebenfalls als Informationsgrundlage für eine Prüfung genutzt werden, wenn die genutzten Maßverkörperungen die merkmalspezifischen Spezifikationsgrenzen repräsentieren.

1.2 Erfolgreiche Durchführung attributiver Prüfungen

In Dietrich und Conrad wird beschrieben, welche Voraussetzungen es für die erfolgreiche Durchführung attributiver Prüfprozessen gibt und welche Punkte beachtet werden sollten, um ein verbessertes und stabileres Ergebnis bei einer attributiven Prüfung zu erhalten (Dietrich/Conrad 2024).

Ein bedeutender Nachteil attributiver Prüfungen liegt darin, dass das Prüfergebnis in hohem Maße von der individuellen Handhabung durch den jeweiligen Prüfer beeinflusst wird. Deshalb sollten beim Einsatz von Lehren folgende Hinweise beachtet werden:

- Alle Lehren sind ohne wesentliche Kraftanwendung zu nutzen.
- Die Gutlehre muss sich ohne Zwang in das Werkstück einführen lassen.
- Die Ausschusslehre darf nur leicht anschnäbeln.
- Bei Rachenlehren kommt es aufgrund ihrer U-Form und der Keilwirkung der Werkstücke zu einer Aufbiegung. Daher wird bei Nennmaßen bis 100 mm empfohlen, das Eigengewicht der Rachenlehre als Messkraft zu verwenden.

Durch die Beachtung der folgenden Punkte ist ein nachweislich besseres und stabileres Prüfergebnis zu erwarten:

- umfassende Einweisung und Schulung der Prüfer
- ausreichende Übung durch die Prüfer mit anschließendem Erfolgsnachweis
- regelmäßige Wiederholungsschulungen mit Erfolgsnachweis
- explizite Motivation des Prüfers durch den Vorgesetzten Folgendes zu beachten:
 - Sorgfalt im Umgang mit den Prüfobjekten und Prüfmitteln
 - Sauberkeit und Ordnung am Arbeitsplatz
- Schaffung eines geeigneten Prüfumfelds:
 - ergonomisch gestalteter Arbeitsplatz, z. B. mit
 - Ablagen für Prüfmittel
 - An- und Ablieferungsbereiche im Griff- und Sichtbereich des Mitarbeiters
 - ausreichende Beleuchtung, in Farbe und Helligkeit der Prüfaufgabe angepasst
 - Schutz gegen störenden und vom Prüfgeschehen ablenkenden Lärm
 - angepasste Temperaturen, Vermeidung von Zugluft und großen Temperaturschwankungen
 - Vermeidung von starken Dauerbelastungen (wie Heben und Tragen schwerer Prüfobjekte)

Insbesondere die zuletzt genannten Punkte sind sogar gesetzlich vorgeschrieben und stellen somit grundlegende Voraussetzungen dar, die vom Arbeitgeber gewährleistet werden müssen.

Die vorangehend aufgeführten Aspekte sind teilweise indirekt in Normen verankert (wie etwa die Motivation) oder werden direkt gefordert (etwa Schulung und Lernkontrolle) und müssen dementsprechend nachgewiesen werden. Das bedeutet, dass festgelegt sein muss, welche Qualifikationen für die jeweiligen Arbeitsschritte erforderlich sind, und nachgewiesen werden muss, dass die ausführenden Personen eine umfassende Schulung erhalten haben (Stichwort: Arbeitsplatzführerschein). Der Erfolg dieser Schulungen (Wirksamkeitsprüfung) ist zu belegen und zu dokumentieren (Dietrich/Conrad 2024).