

Robert Schmitt
Edgar Dietrich

Handbuch Messtechnik in der industriellen Produktion

Valide Messergebnisse planen, erhalten,
auswerten und verteilen



HANSER

Schmitt/Dietrich (Hrsg.)

Handbuch Messtechnik in der industriellen Produktion



Blieben 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

Robert Schmitt (Hrsg.)

Edgar Dietrich (Hrsg.)

Handbuch Messtechnik in der industriellen Produktion

Valide Messergebnisse planen, erhalten, auswerten und verteilen

HANSER

Die Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen/Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, Aachen

Dr.-Ing. Edgar Dietrich, Birkenau

Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor und Verlag die Gewähr dafür, dass beschriebene Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt 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.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2023 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg, Julia Stepp

Herstellung: Melanie Zinsler

Titelmotiv: © shutterstock.com/Pixel B

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

Coverrealisation: Max Kostopoulos

Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten

Druck und Bindung: Druckerei Hubert & Co. GmbH und Co. KG BuchPartner, Göttingen

Print-ISBN: 978-3-446-46559-6

E-Book-ISBN: 978-3-446-46626-5

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	XVII	2.5	Wirtschaftliche Relevanz der Prüfplanung	21
Vorwort	XIX	2.6	Trends und Perspektiven der Prüfplanung	22
Über die Herausgeber	XXI	2.7	Danksagung	22
Autorenverzeichnis	XXIII	3	Adaptive Prüfplanung	23
TEIL I Fähige Mess- und Prüfprozesse etablieren	1		Meike Huber, Jonathan Greipel	
1 Messen und Prüfen als Kernaufgabe der Qualitätssicherung	3	3.1	Einführung in die adaptive Prüfplanung	25
Robert H. Schmitt		3.2	Aufgaben der adaptiven Prüfplanung ..	26
1.1 Bedeutung der Fertigungsmesstechnik in produzierenden Unternehmen	5	3.2.1	Umsetzung der Adaptivität durch übergreifende Prozessströme	26
1.2 Einordnung von Prüfprozessen in den betrieblichen Kontext	6	3.2.2	Umsetzung der Adaptivität innerhalb der Prozessschritte	27
1.3 Nutzung von Messdaten in der Produktion	8	3.2.2.1	Adaption von Prüfmerkmalen	27
2 Prüfplanung	11	3.2.2.2	Adaption des Prüfumfangs	29
Robert Hofmann, Sophie Gröger, Anika Süß		3.2.2.3	Adaption der Prüffrequenz	29
2.1 Definition und Ziele	13	3.2.2.4	Festlegung der Prüfmittelüberwachung, Kalibrierung und Rückführung	31
2.2 Grundlegende Begriffe	13	3.2.2.5	Festlegung der Prüfdatenerfassung und -auswertung	31
2.3 Messen und Prüfen im Produktleben – Prüfzwecke	14	3.2.2.6	Adaption weiterer in der Prüfplanung berücksichtigter Schritte	34
2.4 Ablauf der Prüfplanung	15	3.3	Zusammenfassung und Ausblick	34
2.4.1 Auftrag und Prüfobjekt	16	3.4	Danksagung	35
2.4.2 Prüfmerkmalsdefinition	16	4	Geometrische Produktspezifikation – vom Konstruktionsmerkmal zur Messgröße	37
2.4.3 Fertigungsintegration, Prüfumfang, Prüfort und -mittel	17		Gunter Effenberger	
2.4.4 Prüfmittelüberwachung, -kalibrierung und -rückführung, Eignungsnachweis	19	4.1	Aufbau des Normensystems für die geometrische Produktspezifikation	40
2.4.5 Dokumentation und Weiterverarbeitung der Daten	20	4.2	Grundregeln der geometrischen Produktspezifikation	42
2.4.6 Reaktionspläne, Prüfplanüberwachung, Freigabe	20	4.3	Größenmaße – Bemaßung und Tolerierung	47

4.3.1	Größenmaßelemente und Größenmaße . . .	47	TEIL II Geeignete Mess- und Prüfmittel einsetzen	101
4.3.2	Tolerierungskonzept Hüllbedingung	52		
4.3.3	Spezifizieren von Größenmaßelementen . .	54		
4.3.3.1	Auswahl von Größenmaßmerkmalen	54	1 Bedeutung von Mess- und Prüfmitteln	103
4.3.3.2	Festlegung von Grenzmaßen und Toleranzen für Größenmaße	54	Stephan Conrad	
4.4	Form, Richtung, Ort und Lauf geometrischer Elemente	56	1.1 Sinneswandel zur Relevanz von Mess- und Prüfprozessen	105
4.4.1	Form-, Richtungs-, Orts- und Lauf-toleranzen – Angabe in Zeichnungen	58	1.2 Auswirkungen der Produkthaftung	105
4.4.2	Formtoleranzen	60	1.3 Was sind Mess- und Prüfmittel?	106
4.4.3	Bezug und Bezüge	61	1.4 Normative Anforderungen	107
4.4.4	Richtungstoleranzen	63	1.5 Referenzhandbücher für die Beurteilung von Messsystemen	109
4.4.5	Bezugssystem	66	1.5.1 AIAG Core Tool Measurement System Analysis (MSA)	109
4.4.6	Ortstoleranzen	69	1.5.2 VDA Band 5 „Mess- und Prüfprozesse – Eignung, Planung und Management“	109
4.4.6.1	Position, Koaxialität, Symmetrie	69	1.6 Firmenrichtlinien	110
4.4.6.2	Linien- und Flächenprofil	71	1.7 Beschaffung von Mess- und Prüfmitteln	111
4.4.7	Lauftoleranzen	73	1.7.1 Prüfmittelbeschaffung	112
4.4.7.1	Rundlauf – radial	73	1.7.2 Exemplarische Inhalte eines Lastenhefts . .	112
4.4.7.2	Rundlauf – axial	74	2 Eignungsnachweise für Messprozesse	115
4.4.7.3	Rundlauf in spezifizierter Richtung	75	Edgar Dietrich	
4.4.7.4	Gesamtrundlauf – radial	75	2.1 Einleitung	118
4.4.8	Allgemeintoleranzen für Form und Lage . .	76	2.2 Anforderungen	119
4.5	Weiterführende Aspekte der Geometrietolerierung	77	2.3 Übersicht der Verfahren	120
5	Validierung von Analyse-Software	79	2.4 Fähigkeitsnachweise gemäß Firmenrichtlinie	120
	Markus Schmidt		2.4.1 Untersuchung gemäß Verfahren 1	122
5.1	Testbeispiele	83	2.4.2 Untersuchung gemäß Verfahren 2	125
5.2	AIAG-Testbeispiel Ermittlung R&R (ANOVA)	83	2.5 Fähigkeitsuntersuchung gemäß MSA . .	128
5.3	ISO/TR 11462-4	84	2.5.1 Unterschiede zu Firmenrichtlinien	128
6	Vom EMPB zum exzellenten Produktentstehungsprozess	91	2.5.2 Systematische Messabweichungs-(Bias-) und Linearitätsstudie	128
	Stefan Weber		2.5.3 Wiederhol- und Vergleichspräzision %GRR	129
6.1	Einführung	93	2.5.4 Anzahl unterscheidbarer Kategorien	129
6.1.1	Erstbemusterung im Automotive-Umfeld . .	93	2.6 Eignungsnachweis gemäß VDA 5 bzw. ISO 22514-7	129
6.1.2	Definition	93	2.6.1 Definition von Messsystem und -prozess . .	129
6.2	EMPB – der Garant für hohe Produktqualität	93	2.6.2 Schematisierte Vorgehensweise	130
6.2.1	Erstbemusterung in analogen Zeiten	94	2.6.3 Minimale Toleranz	132
6.2.2	Der digitale Erstmusterprüfbericht	94	2.6.4 Formeln zu den Kennwerten	132
6.2.3	Fokussierte Kommunikation in der Lieferkette	94	2.7 Vergleich von Firmenrichtlinien, MSA mit VDA 5 bzw. ISO 22514-7	135
6.3	EMPB im Kontext des Produktentstehungsprozesses	96		
6.4	Grenzen verschieben – ein Ausblick	98		

2.8	Sonderfälle	139	4.3	Herausforderungen – Einzigartigkeit und Komplexität	167
2.9	Zusammenfassung	139	4.4	Generelles Vorgehen beim Eignungsnachweis	167
3	Eignung attributiver Prüfprozesse ..	141	4.4.1	Beschreibung/Dokumentation des Prüfprozesses	168
	Autorenkollektiv		4.4.2	Identifikation der Einflussgrößen im Ishikawa-Diagramm	169
3.1	Beispieldaten	143	4.4.3	Ableiten des Parameterraums	169
3.2	Kappa-Koeffizient nach Jacob Cohen ...	144	4.4.4	Modellbildung und Unsicherheitsfortpflanzung	170
3.2.1	Rechenschema für den Kappa-Koeffizienten nach Cohen	144	4.5	Experimenteller Ansatz – GUM Typ A ..	172
3.2.2	Rechenschema für den Signifikanztest ...	146	4.5.1	Identifikation der Einflussgrößen	172
3.2.3	Annahmekriterien für Kappa nach Cohen	147	4.5.2	Ableiten des Parameterraums	173
3.2.4	Fallbeispiel: Vergleich Prüfer versus Prüfer	147	4.5.3	Modellbildung	173
3.2.4.1	Fallbeispiel: Bestimmen des Kappa-Koeffizienten nach Cohen	147	4.5.4	Unsicherheitsfortpflanzung	174
3.2.4.2	Fallbeispiel: Signifikanztest für den Kappa-Koeffizienten	149	4.6	Nicht experimenteller Ansatz – GUM Typ B	175
3.2.4.3	Bewertung des Prüfprozesses	150	4.6.1	Modellbildung	175
3.3	Kappa-Koeffizient nach Joseph L. Fleiss	150	4.6.2	Ermittlung der Eingangsgrößen	175
3.3.1	Rechenschema für den Kappa-Koeffizienten nach Fleiss	150	4.6.3	Unsicherheitsfortpflanzung mittels Varianzfortpflanzung	176
3.3.2	Rechenschema für den Signifikanztest ...	152	4.6.4	Unsicherheitsfortpflanzung mittels Monte-Carlo-Simulation	177
3.3.3	Annahmekriterien für Kappa nach Fleiss	153	4.7	Vor- und Nachteile von experimenteller und nicht experimenteller Ermittlung der Messunsicherheit	177
3.3.4	Fallbeispiel: Vergleichbarkeit der Prüferurteile	153	4.8	Eignungsnachweis bei attributivem Prüfergebnis	178
3.3.4.1	Bestimmen des Kappa-Koeffizienten nach Fleiss	153	4.9	Dokumentation des Eignungsnachweises	178
3.3.4.2	Fallbeispiel: Signifikanztest für Kappa-Koeffizienten	154	5	Koordinatenmesssysteme in der digitalen Produktion	181
3.3.4.3	Bewertung des Prüfprozesses	155		Dietrich Imkamp	
3.4	Prüfsystem-Effektivität	155	5.1	Grundlagen der Koordinatenmesstechnik	184
3.4.1	Rechenschema zur Prüfsystem-Effektivität	155	5.1.1	Koordinatenmessgeräte und ihre Sensoren	185
3.4.2	Fallbeispiel zur Prüfsystem-Effektivität ...	155	5.1.2	Koordinatenmesssysteme	189
3.4.3	Annahmekriterien für die Prüfsystem-Effektivität	157	5.1.3	Kenngößen für die Prüfung von Koordinatenmessgeräten und -systemen ..	192
3.4.4	Bewertung des Prüfprozesses	159	5.1.4	Software für Koordinatenmessgeräte und -systeme	194
3.5	Signalerkennung	159	5.2	Koordinatenmesstechnik in der Produktion zur Qualitätsprüfung	196
3.5.1	Fallbeispiel Signalerkennung	159	5.2.1	Organisatorische Einordnung der Qualitätsprüfung	196
3.5.2	Ermittlung der Kenngröße %GRR	160			
3.5.3	Bewertung des Prüfprozesses	161			
4	Eignungsnachweis von Prüfständen	163			
	Philipp Jatzkowski				
4.1	Prüfstände – Rückgrat der industriellen Produktion	166			
4.2	Motivation für den Eignungsnachweis ..	166			

1.8.1.2	Fluchtfernrohr	259	3.2.1	Bildverarbeitungs- und Fokusvariationssensoren	303
1.8.2	Ebenheit	259	3.2.2	Laserabstandssensoren	304
1.8.3	Rechtwinkligkeit	260	3.2.3	Chromatische Fokussensoren	304
1.8.4	Rundheit	261	3.2.4	Konfokale Sensoren	305
1.8.5	Rauheit	263	3.2.5	Interferometrische Sensoren	306
1.9	Koordinatenmessungen	264	3.3	Röntgen-Computertomografie	306
1.9.1	2D-Messmaschinen	265	3.4	Taktile Sensoren	308
1.9.1.1	Messmikroskop	265	3.4.1	Taktilelektrische Sensoren	308
1.9.1.2	Profilprojektor	267	3.4.2	Taktiloptische Mikrotaster	308
1.9.2	3D-Koordinatenmessgerät (KMG)	268	3.4.3	Taktiloptische Kontursensoren	309
1.9.2.1	Prinzip des 3D-KMG	268	3.5	Gerätebauweisen	310
1.9.2.2	Konstruktion von 3D-KMGs	269	3.6	Multisensorintegration	312
1.9.2.3	Spezifikation und Leistungsüberprüfung von KMGs	271	3.7	Anwendung von Multisensorik	313
2	Taktile Messtechnik – die Referenz?	273	3.8	Messsoftware	315
	Harald Bosse, Karin Kniel		4	Automatische Dichtheitsprüfung in der Serienfertigung	319
2.1	Definition und Weitergabe der SI-Einheiten	275		Alexander Stratmann	
2.1.1	Einführung	275	4.1	Einleitung	322
2.1.2	Die Längeneinheit Meter	276	4.1.1	Grundbegriffe	322
2.1.3	Weitere SI-Einheiten	277	4.1.2	Leckströmung	325
2.2	Der Weg zum vergleichbaren Messen	278	4.1.3	Anwendungen und Ergänzungen	326
2.2.1	Prinzip der messtechnischen Rückführung	278	4.1.3.1	Ableitung gasförmiger Leckagerate aus flüssigem Anwendungsfall	326
2.2.2	Bedeutung der Messunsicherheit	280	4.1.3.2	Ableitung gasförmige Leckagerate aus massebezogenem Grenzwert	328
2.2.3	Ermittlung der Messunsicherheit	280	4.1.3.3	Temperatur und Wärmeeinfluss	328
2.2.4	Normale für die Industrie	283	4.2	Qualitätsmethoden	329
2.3	3D-Koordinatenmesssysteme	286	4.2.1	Messprozessfähigkeitsuntersuchung	329
2.3.1	Taktile Sensorik – seit Jahrzehnten bewährt	286	4.2.2	Referenztestleck/Normal	331
2.3.2	CT, optische und Multi-Sensorik – auf dem Vormarsch	288	4.2.3	Prüfstandsregelbetrieb	332
2.4	Alles eine Frage der Genauigkeit?	290	4.3	Leckprüfverfahren	333
2.4.1	Vergleich der Vorteile und Grenzen der Sensorarten	290	4.3.1	Druckmessmethoden	334
2.4.2	Taktile Messtechnik als Referenz auf dem Prüfstand	291	4.3.2	Durchflussmessmethoden	338
2.5	Ein Beispiel: Verzahnungsmesstechnik	292	4.3.3	Spurengasleckprüfung	341
2.5.1	Normgerechte Zahnradmessungen	292	4.3.3.1	Heliumleckprüfung	342
2.5.2	Messtechnische Herausforderungen: Mikro- und Großverzahnungen	292	4.3.3.2	Wasserstoff- bzw. Formiergasleckprüfung	345
2.5.3	Neue Wege und deren Verifizierung	295	4.4	Addendum	346
3	Multisensor-Koordinaten- messtechnik	299	5	Härteprüfung in der praktischen Anwendung	349
	Ralf Christoph, Schirin Heidari Bateni			Febo Menelao	
3.1	Sensorsystematik	301	5.1	Die Verfahren nach Rockwell, Brinell und Vickers kurz vorgestellt	351
3.2	Optische Sensoren	303	5.2	Zusammenhang zwischen Brinell- und Vickers-Härtetest	353

5.3	Anwendungsbereiche von Rockwell, Brinell und Vickers: Wann wird welches Verfahren eingesetzt?	354	7.1.3.2	Machine-Vision-Systeme	383
5.4	Vor- und Nachteile unterschiedlicher Härtemessverfahren	354	7.1.4	Vor- und Nachteile der Automatisierung ..	387
5.5	Umwertung von Härtewerten	355	7.1.5	Sichtprüfung im Kontext von Industrie 4.0	388
5.6	Unsicherheit bei der Umwertung	355	7.2	Fallbeispiel – Automatisierte Farbeindringprüfung in der Gasturbinenindustrie ..	390
6	Messtechnik in der Schraubtechnik 357		7.2.1	Grundlagen der Farbeindringprüfung	391
	Niels Rabbe		7.2.2	Automatisierte Oberflächenrisserkennung bei der Farbeindringprüfung an Turbinenleitschaufeln	393
6.1	Einführung in die Schraubtechnik	359	7.2.3	Bestimmung der Messunsicherheiten nach VDA 5	400
6.2	Schraubwerkzeuge	362	7.2.4	Zusammenfassung und Ausblick	401
6.2.1	Der Drehmomentschlüssel	362	7.3	Zusammenfassung	401
6.2.2	Motorisch betriebenes Schraubwerkzeug mit Abschaltkupplung	363	8	Weißlichtinterferometrie	405
6.2.3	Impulsschrauber	363		Wilfried Bauer	
6.2.4	Motorisch betriebenes Schraubwerkzeug mit Drehmoment oder mit Drehmoment plus Drehwinkelsteuerung	364	8.1	Einleitung	407
6.2.5	Beispiel Drehwinkelmessung	365	8.2	Kohärenz, konstruktive und destruktive Interferenzen	408
6.2.6	Streckgrenzsteuerung	365	8.3	Grundlagen der Interferometrie	408
6.2.7	Vorspannen von Schrauben durch Zugkraft	366	8.3.1	Interferometrie mit monochromatischem Licht	408
6.2.8	Vorspannen von Schrauben durch thermische Dehnung	367	8.3.2	Grundlagen des Weißlichtinterferometers	411
6.3	Prüfen von bereits montierten Schraubverbindungen	367	8.4	Auswertung der Messsignale und Korrelogramme	414
6.3.1	Klemmkraftsensoren	367	8.5	Mikroskopischer und telezentrischer Strahlengang bei scannenden Weißlichtinterferometern	416
6.3.2	Messung mittels Ultraschall	368	8.6	„Phaseshift“-Methode als Alternative zur Weißlichtinterferometrie	417
6.3.3	Messung des Weiterdrehmoments	369	8.7	Beugungsbegrenztes laterales optisches Auflösungsvermögen nach Rayleigh oder Sparrow	418
6.4	Statische Kalibrierung von Schraubwerkzeugen	371	8.8	Messzeiten	422
6.5	Prüfung von Schraubwerkzeugen	372	8.9	Messung an geneigten oder schrägen Flächen	422
6.6	Prozessfähigkeitsprüfung von Schraubverbindungen	373	8.10	Messungen von Oberflächen, die aus unterschiedlichen Materialien bestehen	425
6.7	Rückführung auf das dynamische Drehmoment bei kontinuierlich rotierenden Schraubwerkzeugen	374	8.11	Mess- und Instrumenten-Rauschen	426
6.8	Kompetenz in der Schraubtechnik	374	8.12	Eindeutigkeit des Strahlengangs und deren Störungen durch die Oberflächenstruktur	427
7	Sichtprüfung	375	8.13	Bestimmung von Texturparametern mit Weißlichtinterferometern	433
	Kilian Geiger, Hamid Jahangir, Oscar Malinowski				
7.1	Grundlagen	377			
7.1.1	Aufgaben der Sichtprüfung	377			
7.1.2	Mögliche Fehlereinflüsse	379			
7.1.3	Automatisierung der Sichtprüfung	381			
7.1.3.1	Prüfkörperzuführung und -handhabung ..	381			

8.14	„Batwings“	438	9.4.1	Röntgenröhre	478
8.15	Räumliche topografische Strukturauflösung	440	9.4.1.1	Reflexions- und Transmissionstargets	479
8.16	Schnelle und zuverlässige Qualitätskontrolle: Einsatz von Weißlichtinterferometern in der Produktionsüberwachung und Qualitätssicherung	446	9.4.1.2	Elektronenstrahlerzeugung und -fokussierung	480
8.17	Beispiele von Anwendungen für mikroskopische und telezentrisch aufgebaute Weißlichtinterferometer	450	9.4.1.3	Reduzierung von Betriebskosten	481
8.18	Ausgewählte Applikationen für den Einsatz von Weißlichtinterferometern ..	452	9.4.2	Drehachse	482
9	Computertomografie in der Koordinatenmesstechnik	459	9.4.3	Röntgendetektor	482
	Raoul Christoph, Marc Kachelrieß		9.4.3.1	Indirekte Detektion nach dem Szintillationsprinzip	482
9.1	Funktionsprinzip der Röntgen-Computertomografie	462	9.4.3.2	Zeilen- und Flächendetektoren	483
9.1.1	Röntgenröhre: Erzeugung der Röntgenstrahlung	462	9.4.4	Linearachsen	483
9.1.2	Vorfilter und Messobjekt: Wechselwirkung der Röntgenstrahlung mit Materie	463	9.4.4.1	Einstellen von Vergrößerung und Kegelstrahlwinkel	484
9.1.3	Detektor: Erfassung der Röntgenstrahlung	465	9.4.4.2	Mehrere CT-Sensoren und Multisensorik..	484
9.1.4	Vom Intensitätsbild zum Projektionsbild ..	465	9.4.5	Strahlenschutzmaßnahmen	485
9.1.5	Vom Bilderstapel zum Volumen	466	9.5	Messabweichungen: Verursachende Effekte und Korrektur	485
9.2	Auswertung für industrielle Anwendungen	466	9.5.1	Systematische Messabweichungen	485
9.2.1	Vom Intensitätsbild oder Volumen zur Messpunktewolke	467	9.5.1.1	Strahlaufhärtung	485
9.2.2	Inspektion des Werkstücks	469	9.5.1.2	Streustrahlung	486
9.2.2.1	Werkstückvisualisierung und Inspektion der Materialstruktur	470	9.5.1.3	Kegelstrahlartefakte	486
9.2.2.2	Automatische Analyse innen- und außenliegender Störungen	471	9.5.1.4	Empirische Artefaktkorrektur	486
9.2.3	Messen der Werkstückgeometrie	472	9.5.1.5	Virtuelle Autokorrektur	487
9.2.3.1	Maßliche Auswertung des Werkstücks ..	472	9.5.2	Zufällige Messabweichungen	487
9.2.3.2	3D-Soll-Ist-Vergleich	474	9.6	Spezielle Tomografieverfahren	488
9.2.4	Gemeinsame Lösung von Inspektions- und Messaufgaben	474	9.6.1	Messzeit oder Rauschen reduzieren mittels OnTheFly-Tomografie	488
9.3	Abbildungsgeometrie	474	9.6.2	Messbereich oder Strukturauflösung vergrößern	488
9.3.1	Vergrößerung	475	9.6.2.1	Abschnittstomografie, longitudinales Rastern und Helix-Tomografie	489
9.3.2	Messbereich	475	9.6.2.2	Halbseitentomografie und laterales Rastern	490
9.3.3	Orts- und Strukturauflösung	475	9.6.2.3	ROI- und exzentrische Multi-ROI-Tomografie	490
9.3.4	Optimierung der Abbildungsgeometrie ..	477	9.6.2.4	Swing- und Planar-Laminografie	490
9.3.4.1	Optimierung der Vergrößerung	477	9.7	Messgenauigkeit	492
9.3.4.2	Optimierung von Brennfleck- und Pixelgröße	477	9.7.1	Spezifikationsüberprüfung	492
9.3.4.3	Optimierung der Drehschrittzahl	478	9.7.1.1	Antastabweichung	492
9.4	Gerätetechnik und Bauformen	478	9.7.1.2	Längenmessabweichung	492
			9.7.2	Messunsicherheitsbestimmung	493
			9.8	Ausblick	494
			9.8.1	Photonenzählende Detektoren	494
			9.8.2	Artefaktkorrektur mittels künstlicher Intelligenz	495
			10	Bildverarbeitung	499
				Ralf Christoph, Schirin Heidari Bateni	
			10.1	Einführung	501
			10.2	Abbildung	501

10.3	Beleuchtung	504	12.4	Messverfahren	551
10.4	Kamera	506	12.4.1	Bildmessung	551
10.5	Messsoftware	507	12.4.1.1	Messung von Zielmarken	551
10.6	Auflösung	510	12.4.1.2	Messung von natürlichen Merkmalen	552
10.7	Integration in Koordinatenmessgeräte ..	511	12.4.1.3	Präzise Messung von Oberflächenmustern	552
11	Lasertracker	517	12.4.1.4	Streifen- und Musterprojektionsverfahren	553
	Raimund Loser		12.4.2	Orientierung	554
11.1	Genauigkeitsanforderung als Entwicklungsgrundlage	519	12.4.2.1	Orientierungsverfahren	554
11.2	Funktionsprinzip des Lasertrackers ...	520	12.4.2.2	Epipolargeometrie	555
11.3	Lasertracker mit Absolutdistanz- messer (ADM)	522	12.4.2.3	Structure-from-Motion	555
11.3.1	ADM mit Polarisationsmodulation	522	12.4.2.4	Simultaneous Localization and Mapping ..	556
11.3.2	ADM nach dem Phasenvergleichs- verfahren	524	12.4.2.5	Koordinatensysteme	556
11.4	Kalibrierung und Systemparameter	525	12.4.3	3D-Berechnung	557
11.5	Bestimmung des Referenzpunktes (Nullpunktdistanz oder Additions- konstante)	527	12.5	Genauigkeit und Verifizierung	558
11.6	Einfluss der Atmosphäre	528	12.5.1	Kenngößen	558
11.7	Lasertrackererweiterung zur 6D-Datenerfassung	529	12.5.2	Prüfkörper und Normale	559
11.7.1	Funktionsweise des 6D-Lasertracker- systems	530	12.5.3	Normen und Richtlinien	560
11.7.2	Lasertracker Kamera (T-Cam)	533	12.6	Anwendungen und Messsysteme	561
11.7.3	Lasertracker Probe (T-Probe)	533	12.6.1	Offline-Photogrammetrie	561
11.7.4	Lasertracker Automatisierung Machine-Control (T-Mac-Varianten)	534	12.6.1.1	Kamerakalibrierung mit Testfeld	561
11.7.5	Lasertracker Scanner (T-Scan)	535	12.6.1.2	Deformationsmessungen	562
11.7.6	Realtime-Funktionalität	536	12.6.1.3	Messung großer Oberflächen durch Streifenprojektion	563
11.8	Neueste Generationen von Lasertrackern	537	12.6.1.4	Formerfassung durch Structure- from-Motion	563
12	Photogrammetrie	541	12.6.2	Online-Photogrammetrie	565
	Thomas Luhmann		12.6.2.1	Mobile Systeme zur Fertigungskontrolle ..	565
12.1	Einführung	543	12.6.2.2	System zur Vermessung von Rohrleitungen	566
12.1.1	Einordnung	543	12.6.2.3	System zur Positionierung von Stahlplatten	566
12.1.2	Messprinzip	544	12.6.2.4	Dynamische Messtechnik im Windkanal ..	568
12.2	Aufnahmetechnik	545	12.6.2.5	Integrierte Messzellen	568
12.2.1	Kamerasysteme	546	13	Optische Kohärenztomografie	571
12.2.2	Beleuchtung und Signalisierung	547		Niels König, Fabian Hübenthal (†), Max Riediger, Alfredo Velazquez, Charlotte Stehmar	
12.3	Kamerakalibrierung	549	13.1	OCT-Technologie	573
12.3.1	Zielsetzung	549	13.1.1	Grundlagen der kurzkohärenten Interferometrie	573
12.3.2	Geometrisches Kameramodell	549	13.1.2	Grundaufbau von OCT-Systemen	576
12.3.3	Strategien und Aufnahmeanordnungen ...	550	13.1.3	Signalverarbeitung	579
			13.1.4	OCT-Erweiterungen	580
			13.2	Optische Kohärenztomografie in der Fertigungsmesstechnik	582
			13.2.1	Laserprozesskontrolle	584
			13.2.2	OCT für die zerstörungsfreie Prüfung	586
			14	Laserradar	589
				Alexander Schönberg	
			14.1	Einführung	591

14.1.1	Einordnung	591	15.4.2	Roboterassistierte Ultraschallmesszelle mit adaptiver Messkopfausrichtung	626
14.1.2	Messprinzip	591	15.4.3	Automatisierte Prüfung von Falzklebeverbindungen mit Ultraschall	627
14.2	Komponenten	593	16	Thermografie	629
14.2.1	Distanzmessung	593		Dominik Wolfschläger, Niels Holtmann, Thomas Zweschper	
14.2.2	Azimet und Elevation	594	16.1	Physikalische Grundlagen	631
14.2.3	Prozesskamera	595	16.2	Thermografiekameras	633
14.2.4	Referenzierung	595	16.3	Anregungssignale und Auswertemethoden	634
14.2.5	Sensorpositionierung	597	16.3.1	Lock-in-Thermografie	635
14.2.6	Bauteilpositionierung	598	16.3.2	Pulsthermografie	636
14.3	Kalibrierung	599	16.3.3	Bildverarbeitung	637
14.3.1	Zielsetzung	599	16.3.3.1	Rohdaten	638
14.3.2	Geometrisches Sensormodell	599	16.3.3.2	Bildvorverarbeitung	638
14.3.3	Bündelung von Standpunkten	600	16.3.3.3	Merkmalsextraktion	638
14.3.4	Bauteilausrichtung	601	16.3.3.4	Bildanalyse	639
14.4	Messverfahren	601	16.4	Anregungsquellen	640
14.4.1	Merkmale und Standpunkte	601	16.4.1	Halogenlampen-Anregung	641
14.4.2	Scan- und Antaststrategien	603	16.4.2	Blitzlampen-Anregung	641
14.4.3	Merkmalsauswertung	604	16.4.3	Ultraschall-Anregung	642
14.4.4	Messwerterstellung	606	16.4.4	Induktions-Anregung	642
14.5	Genauigkeit und Verifizierung	606	16.4.5	Laser-Anregung	643
14.5.1	Verfahren und Kenngrößen	606	16.4.6	Hinweise zur Auswahl des Thermografieverfahrens	644
14.5.2	Unsicherheitsbudgets	607	16.5	Thermografie-Systeme in der Produktion	644
14.5.3	Wiederholbarkeits-Tests	607	17	Messen auf Werkzeugmaschinen	647
14.5.4	Prüfprozesseignung	608		Maximilian Macha, Philipp Dahlem	
14.5.5	Korrelation und Vergleichbarkeit	608	17.1	Einleitung	649
14.6	Anwendungen und Integrationsgrade	609	17.2	Anwendungsfälle für On-Machine-Messungen	650
15	Industrielle Ultraschallmesstechnik	613	17.2.1	Prozesseinrichtung	650
	P. Nienheysen, L. Stohrer, W. Kimmelman, A. Sadovoy, A. Niola, G. De Coppel		17.2.2	Prozessüberwachung während der Fertigung	650
15.1	Physikalische Grundlagen	615	17.2.3	Endkontrolle des Werkstücks in der Aufspannung	651
15.1.1	Schallwellen	615	17.3	Messsystemtypen für Werkzeugmaschinen	653
15.1.2	Schallfeldgeometrie	616	17.3.1	Standardmesstaster	654
15.2	Ultraschallmessverfahren	617	17.3.2	Hochpräzisionsmesstaster	654
15.2.1	Konventionelle Ultraschallmessverfahren	617	17.3.3	Temperaturmesstaster	655
15.2.2	Ultraschallprüfköpfe	618	17.3.4	Ultraschallmesstaster	656
15.2.3	Phased-Array-Ultraschallmessung	619	17.3.5	Optische Messsysteme mittels Laser-Triangulation (Laserscanner)	657
15.3	Analyse der Ultraschallmessdaten	620	17.3.6	Steuerungstechnische Anbindung des Tastsystems	659
15.3.1	Darstellung der Schallintensität über der Laufzeit	620			
15.3.2	Visualisierungsverfahren für Ultraschallmessdaten	621			
15.3.3	Anwendungsbeispiel zur Dickenmessung	623			
15.3.4	Verfahren zur Fehlergrößenbestimmung	623			
15.4	Automatisierung der Ultraschallmesstechnik	624			
15.4.1	Roboterassistierte Ultraschallmesszelle mit integrierter 3D-Geometriemessung	625			

17.3.7	Datenübertragung von Messtaster zu Empfängereinheit	659	2	Datenformate	691
				Michael Wagner	
17.4	Qualifizierung von Messungen auf Werkzeugmaschinen	660	2.1	Allgemeine Hinweise	693
17.4.1	Begrifflichkeiten der Wiederholgenauigkeit, Pre-Travel (Lobing) und 3D-Error	661	2.2	Die Bedeutung von Datenformaten in der Smart Factory	693
17.4.1.1	Wiederholpräzision/-genauigkeit	661	2.3	Datenformate im Überblick	693
17.4.1.2	Pre-Travel	662	2.3.1	Standards	693
17.4.1.3	3D-Formfehler	664	2.3.2	Q-DAS ASCII Transferformat	694
17.4.2	Eignungsnachweise für On-Machine Measurements – Normen- und Richtlinien	665	2.3.2.1	Struktur	694
17.4.3	OMM-Enablertechnologien und Forschungsperspektive	667	2.3.2.2	Datenmodell	695
17.5	Fazit und Ausblick	669	2.3.3	Advanced Quality Data Exchange Format (AQDEF)	697
			2.3.4	Quality Markup Language	702
			2.4	Ausblick	703
TEIL IV	Messdaten verarbeiten, verteilen, nutzen	671	3	Von der Wareneingangsprüfung bis zur End-of-Line-Prüfung in der Montage	705
				Horst Lang, Achim Huberty	
1	Messdaten verarbeiten, verteilen, nutzen – aktuelle Entwicklungen	673	3.1	Einleitung	707
	Benjamin Montavon, Matthias Bodenbenner		3.2	Wareneingangsprüfung/ Prozessdokumentation bei Lieferanten	707
1.1	Messdaten und ihre Rolle in der Industrie 4.0	675	3.2.1	Kurzzeitfähigkeitsuntersuchung	707
1.1.1	Der Lebenszyklus von Messdaten in der Industrie 4.0	676	3.2.2	Vorabnahme beim Lieferanten	711
1.1.2	Herausforderungen	677	3.3	Laufende Fertigungsüberwachung und deren Voraussetzungen	712
1.1.3	Anforderungen	678	3.3.1	Beschaffung von Fertigungseinrichtungen für einen beschriebenen Herstellungsprozess	712
1.2	Dezentralisierung der Messdatenerzeugung, -verarbeitung und -nutzung	679	3.3.2	Durchführung einer Vorabnahme beim Hersteller	712
1.2.1	Nicht-monolithische Konzepte	679	3.3.3	Durchführung einer Abnahme beim Kunden	715
1.2.2	Separation of Concern	680	3.3.4	Prüfprozesseignung der eingesetzten Messtechnik	715
1.2.3	IoT-Infrastrukturen	681	3.3.5	Laufende Fertigungsüberwachung zur Dokumentation der Langzeitstabilität	716
1.3	Aktuelle Entwicklungen	683	3.4	Montageendprüfung/Funktionsprüfung	718
1.3.1	Modelle für Messdaten	683	3.5	Auszug möglicher Standardgeräte für den Einsatz im Produktionsumfeld	719
1.3.1.1	SensOr Interfacing Language (SOIL)	683	4	SPC für kleine Losgrößen und Einzelfertigung	723
1.3.1.2	Verwaltungsschale – Asset Administration Shell	683		Wolfgang Schultz	
1.3.1.3	Das digitale Kalibrierzertifikat (DCC)	684	4.1	Die Bedeutung von SPC in der industriellen Produktion	725
1.3.2	Protokolle und Formate	684			
1.3.2.1	HTTP & REST-API	684			
1.3.2.2	Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)	685			
1.3.2.3	OPC Unified Architecture (OPC UA)	685			
1.3.2.4	MTConnect	686			
1.3.2.5	SmartCom Digital System of Units (D-SI) ..	686			
1.3.3	Unternehmensübergreifender Datenaustausch	687			

4.2	Ansätze für SPC bei kleinen Stückzahlen	728	5.5	Der Wert von Messdaten	760
4.3	Anwendungsbeispiele aus verschiedenen Prozessen	735	6	Predictive Maintenance – wie KI den Betrieb von Produktionssystemen revolutionieren kann	763
4.4	Fazit	739		Martin Peterek	
5	Erfassung von Messdaten	741	6.1	Einleitung	765
	Thomas Froese		6.2	Advanced Analytics in produzierenden Unternehmen	765
5.1	Einführung	743	6.3	Anwendungsbeispiel Messsysteme	766
5.2	Speicherung von Messdaten	743	6.4	Anwendungsbeispiel Werkzeugmaschinen und Roboterkinematiken ...	768
5.2.1	Kurzzeitige Speicherung im PLS oder im Labor	743	6.5	Handlungsempfehlungen für die Praxis	769
5.2.2	Schnittstellen	744	7	Einführung in Predictive Quality	771
5.2.3	Langfristige Speicherung in PI(M)S	744		Sebastian Beckschulte, Betül Güngör	
5.2.4	Strukturierte Ablage in Datenbanken/ „Single Source of Truth“	745	7.1	Digitale Transformation zur Befähigung zukunftsfähiger Produktionssysteme ..	774
5.2.5	Bereitstellung und Verteilung von Messdaten	745	7.1.1	Der digitale Wandel	774
5.3	Bereinigung und Bewertung von Messdaten	746	7.1.2	Erfolgsfaktoren für zukunftsfähige Produktionssysteme	775
5.3.1	Messdatenvalidierung	746	7.2	Zukunftsfähige Produktionssysteme durch Predictive Quality	776
5.3.1.1	Massebilanzen und Stoffbilanzen	746	7.2.1	Big Data als technologische Grundlage ...	776
5.3.1.2	Enthalpie-/Energiebilanzen	746	7.2.2	Data Analytics als methodischer Befähiger	779
5.3.1.3	Statistische Datenvalidierung	747	7.2.3	Predictive-Quality-Ansatz zur Optimierung der Produktqualität am Beispiel eines Nutzfahrzeugherstellers	780
5.3.1.4	SOM-Filterung	747	7.3	Potenziale und Ausblick	783
5.3.2	Vollständigkeit und Nutzbarkeit von Daten/SIPOC	748	8	Process Mining	785
5.3.3	Datenbereinigung	749		Jimmy Chhor, Simon Cramer, Max Ellerich, Markus Ohlenforst	
5.3.4	Umgang mit stochastischem Rauschen ...	750	8.1	Einordnung von Analysetechniken	787
5.3.5	Produktverfolgung und Fingerprinting in Datensätzen	750	8.2	Data Mining und Process Mining	788
5.3.5.1	Produktverfolgung in Fertigungsverfahren	750	8.3	Grundlagen zu Process Mining	789
5.3.5.2	Produktverfolgung in kontinuierlichen Prozessen	750	8.4	Datenquellen für Process Mining in Unternehmen	791
5.3.5.3	Batchfingerprinting	751	8.5	Fallstudie in der Produktion	792
5.3.6	Von Big Data zu Smart Data	752	8.6	Herausforderungen für den Einsatz in der Produktion	794
5.4	Nutzung von Messdaten	753	8.7	Ausblick	795
5.4.1	Analyse einzelner Zeitreihen	753	Stichwortverzeichnis	797	
5.4.2	Komplexe Datenanalyse	754			
5.4.2.1	Korrelationsanalysen	754			
5.4.2.2	Parallelkoordinaten	754			
5.4.2.3	Entscheidungsbäume	755			
5.4.3	Modellierung	756			
5.4.3.1	Whitebox-Modelle	756			
5.4.3.2	Blackbox-Modelle	756			
5.4.3.3	Hybride Modelle	757			
5.4.3.4	Nutzung von Modellen	757			
5.4.4	Softsensorik	757			
5.4.5	Prädiktive Regelung mit Softsensoren ...	759			
5.4.6	RTO, Echtzeitoptimierung mit Messdaten	759			

Danksagung

Dieses Handbuch konnte nur durch die fundierten Beiträge vieler Experten entstehen. Ihnen gebührt unser herzlicher Dank für die aufgebrauchte Zeit und die Bereitschaft, ihren Erfahrungsschatz zu teilen. Ohne sie wäre es nicht möglich gewesen, ein Handbuch in dieser Form herauszubringen.

Weiterhin möchten wir uns recht herzlich bei Volker Herzberg und Julia Stepp vom Carl Hanser Verlag bedanken, die sich um die durchgängige Betreuung von der Idee bis zur Veröffentlichung gekümmert haben.

Schlussendlich möchten wir noch Tobias Müller danken, der als Wissenschaftlicher Mitarbeiter die fachliche Koor-

dination der Autoren sowie die lehrstuhlseitige Betreuung des Handbuchs übernommen hat. Die Vorarbeiten von Christoph Voigtmann und Jonathan Greipel aufgreifend, hat Herr Müller mit großer Ausdauer und hohem Engagement die Inhalte vorangetrieben und das Handbuch zur Veröffentlichung gebracht.

Aachen/Birkenau, Mai 2023

Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt

Dr.-Ing. Edgar Dietrich

Vorwort

Messtechnik ist die Quelle objektiv belastbarer Daten und der daraus gewonnenen Informationen. Das Vertrauen auf deren Aussagekraft hinsichtlich der Erfassung eines Sachverhalts ist die Währung, in der der Wert von Messergebnissen gehandelt wird. Vertrauen ist auch der Begriff, mit dem die Qualitätssicherung als elementarer Bestandteil des Qualitätsmanagements verbunden ist, nämlich in Bezug auf das Erzeugen von Vertrauen, dass Qualitätsanforderungen erfüllt werden.

Die Herausforderungen der stetigen oder gar ständigen Überprüfung aller Qualitätsanforderungen bei Prozessen und Produkten unter Fertigungsbedingungen sind zahlreich. Genau hier setzt dieses Handbuch an. Die industrielle Messtechnik wird als produktionsbegleitender, permanenter Prozess verstanden, bei dem unterschiedlichste Aufgaben erledigt werden müssen, um valide Messdaten zu erhalten, zu verwalten und zu analysieren. Mit diesem Buch möchten wir dazu beitragen, die erforderlichen technischen Grundlagen für eine effiziente, verlustarme, nachhaltige und perspektivisch zirkuläre Wertschöpfung zu vermitteln.

Das Handbuch ist in vier Teile gegliedert, die sich mit den folgenden Fragestellungen beschäftigen und entsprechende Lösungen aufzeigen:

- Wie müssen die Mess- und Prüfprozesse aussehen?
- Was ist zu tun, um stets geeignete Mess- und Prüfmittel verfügbar zu haben?
- Mit welchen Messverfahren lassen sich die erforderlichen Messdaten unter Produktionsbedingungen am besten gewinnen?
- Wie werden die Daten sinnvoll genutzt?

Jeder der vier Teile des Buches umfasst mehrere Kapitel, in denen jeweils einzelne Bestandteile der Fragestellung aufgegriffen, analysiert und Lösungen in Form von Hinweisen für die Praxis geliefert werden. Durch die Beteiligung von über 60 Expertinnen und Experten aus diversen Unternehmen und Fachrichtungen können eine Vielzahl von Themen aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet werden und das faszinierende Spektrum der Messtechnik kann in voller Breite aufgespannt werden.

Ein besonderer Akzent des Buches liegt auf der Behandlung der Messtechnik als Datenquelle. Gerade im Rahmen von Industrie 4.0 gewinnt die massenweise, aber doch spezifische Generierung von Daten eine immer größere Bedeutung, die über die klassische, reaktive Qualitätssicherung hinausgeht. Es wird dadurch effizienter möglich, die Daten zu verteilen und auszuwerten, wenn gleichzeitig die Datenqualität gewährleistet werden kann. Denn nur, wenn man weiß, welche Informationen dem System in welcher Qualität zur Verfügung stehen, kann man die daraus resultierenden Ergebnisse verwerten, z. B. um ein besseres Prozessverständnis zu bekommen, um Abläufe zu simulieren oder zu modellieren.

Die Idee, Handbücher als Leitfäden für die Praxis herauszugeben, hat sich bewährt. So wurde zum Beispiel in den 80er Jahren in vielen Firmen SPC (Statistical Process Control) eingeführt. Zur Beurteilung von Prüf- bzw. Messprozessen gab es jedoch so gut wie keine Vorgaben, keine Richtlinien oder Leitfäden von Verbänden wie dem Verband der Automobilindustrie (VDA) oder der Automotive Industry Action Group (AIAG). Auch Normen für diese Aufgabenstellung sind erst später entstanden. Viele Anwender von SPC mussten feststellen, dass bei der Beurteilung der Fertigungs- bzw. Produktionsprozesse ein Großteil der in den Messwerten beobachteten Streuung nicht dem Herstellungsprozess, sondern dem Messprozess anzulasten ist. Konsequenterweise hat man firmeninternen Verfahrensanweisungen erstellt, anhand derer vor der Anwendung von SPC die Prüf- bzw. Messprozesse auf deren Eignung beurteilt wurden. Ohne konkrete Vorgaben seitens der Normung bzw. von Verbänden entstand jedoch ein gewisser, wenn auch in spezifischen Domänen nützlich erscheinender Wildwuchs von unterschiedlichen Vorgehensweisen. Diese nicht zufriedenstellende Inkompatibilität von unterschiedlichen Vorgehensweisen erschwerte die Anwendung in Unternehmen und auch die Zusammenarbeit zwischen Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette. Als Reaktion auf diese Situation entstand unter der Leitung der Firma Q-DAS ein Leitfaden zum Fähigkeitsnachweis von Messsystemen. Dieser Leitfaden führte die bestehenden Kenntnisse zusammen und bildete

als Handbuch eine Orientierungshilfe für praktische Anwendungen.

Ähnlich dem Leitfaden zum Fähigkeitsnachweis von Messsystemen orientiert sich auch dieses Handbuch schwerpunktmäßig an den in der Praxis auftretenden Problemen. Grundlagen werden dann einbezogen, wenn sie für fehlerfreies Arbeiten durch vertiefendes Verständnis unverzichtbar sind. Ziel dieses Handbuches ist es, relevante Messverfahren, wie sie in der industriellen Produktion verwendet werden, zu beschreiben, und unter gültigen Anforderungen Unterstützung für den realen Einsatz liefern.

Dementsprechend kann und will das Buch keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, sondern vielmehr Hilfestellungen für die Praxis anbieten, Neugier auf dieses faszinierende Gebiet wecken und nach Möglichkeit Impulse für weitere Entwicklungen geben. Den Herausgebern

sowie allen beteiligten Autorinnen und Autoren ist bewusst, dass nach Erscheinen dieses Buches kontinuierlich neue Messverfahren hinzukommen werden oder sich die Gewichtung ihrer Bedeutung im industriellen Umfeld ändern wird. Das gilt ebenso für das Normenumfeld, das sich mit der Zeit ändert. Daher sind wir für Anregungen und Ergänzungen jeder Art dankbar.

Wir hoffen, dass Ihnen dieses Buch ein hilfreiches Nachschlagewerk sein wird, in dem Sie Antworten auf Ihre Fragen, zahlreiche Inspirationen und viele gute Lösungsansätze finden werden, die dazu beitragen, die Messtechnik kontinuierlich weiterzuentwickeln.

Aachen/Birkenau, Mai 2023

Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt

Dr.-Ing. Edgar Dietrich

Über die Herausgeber



Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt ist Inhaber des Lehrstuhls Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement. Er ist Direktor des WZL der RWTH Aachen und Direktor am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT. Er engagiert sich unter anderem in der Deutschen Gesellschaft für Qualität e.V. (DGQ),

deren Präsident er seit 2021 ist. Seine Forschungsschwerpunkte umfassen die informationstechnische Verarbeitung sensorisch erhobener Daten und deren Einbindung in ein modernes Qualitätsmanagement.



Dr.-Ing. Edgar Dietrich war Mitbegründer und langjähriger Geschäftsführer der Q-DAS GmbH & Co. KG, die er 2015 an Hexagon MI verkaufte. Zuvor war er Professor für Technische Informatik der Dualen Hochschule in Mannheim und mehrere Jahre Vorsitzender des ISO TC 69 SC 4, das für alle ISO-Normen zur

statistischen Analyse im Produkt- und Prozessmanagement verantwortlich ist. 2019 gründete er die IconPro GmbH und ist deren Mitgesellschafter.

Autorenverzeichnis

Wilfried Bauer

ehemals Polytec GmbH, Waldbronn

Sebastian Beckschulte

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement

Matthias Bodenbenner

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement

Dr. Harald Bosse

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB),
Braunschweig

Jimmy Chhor

Nexaro GmbH, Wuppertal

Dr.-Ing. habil. Ralf Christoph

Werth Messtechnik GmbH, Gießen

Dr.-Ing. Raoul Christoph

Werth Messtechnik GmbH, Gießen

Stephan Conrad

Q-DAS GmbH part of Hexagon, Weinheim

Simon Cramer

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement

Dr.-Ing. Philipp Dahlem

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement

Geert De Coppel

Audi Brussels S.A.

Dr.-Ing. Edgar Dietrich

IconPro GmbH, Aachen

Dr. Gunter Effenberger

ehemals Q-DAS GmbH part of Hexagon, Weinheim

Dr. Max Ellerich

NEUMAN & ESSER, Übach-Palenberg

Thomas Froese

VDI, Niederkrüchten

Kilian Geiger

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement

Jonathan Greipel

Liebherr-Hausgeräte Ochsenhausen GmbH

Prof. Dr.-Ing. habil. Sophie Gröger

Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau,
Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse, Professur Fertigungsmesstechnik

Betül Güngör, M.Sc. RWTH Wirt.-Ing. Maschinenbau

EMEA Distribution Performance Analyst, Bayer AG

Prof. Han Haitjema

Manufacturing metrology section, Manufacturing Processes and Systems, Mechanical Engineering Department, KU Leuven, Leuven, Belgium

Dr.-Ing. Schirin Heidari Bateni

Werth Messtechnik GmbH, Gießen

Robert Hofmann

Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau,
Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse

Niels Holtmann

Spiegel-Institut Ingolstadt GmbH

Fabian Hübenthal (†)

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT,
Aachen

Meike Huber

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitäts-
management

Achim Huberty

Festo SE & Co. KG, Esslingen

Dr. Dietrich Imkamp

Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen

Hamid Jahangir

ehemals Siemens Energy Global GmbH & Co. KG, Aachen

Dr.-Ing. Philipp Jatzkowski

Test Industrial Service GmbH, Kirchzarten

Prof. Dr. Marc Kachelrieß

X-Ray Imaging and Computed Tomography, Deutsches
Krebsforschungszentrum, Heidelberg

Dr.-Ing. Walter Kimmelmann

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitäts-
management

Dr.-Ing. Karin Kniel

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB),
Braunschweig

Niels König

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT,
Aachen

Horst Lang

Festo SE & Co. KG, Esslingen

Dr. Raimund Loser

Confema GmbH, Sisseln

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Thomas Luhmann

Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geo-
informatik (IAPG), Jade Hochschule Wilhelmshaven/
Oldenburg/Elsfleth

Maximilian Macha

m&h Inprocess Messtechnik/Hexagon, Waldburg

Oscar Malinowski

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen

Febo Menelao

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB),
Braunschweig

Dr. Benjamin Montavon

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitäts-
management

Dr.-Ing. Philipp Nienheysen

DB Netz AG, Frankfurt am Main

Antonio Niola

Europea Microfusioni Aerospaziali S.p.A. – Rolls-Royce
plc, Morra De Sanctis

Dr.-Ing. Markus Ohlenforst

IconPro GmbH, Aachen

Dr.-Ing. Martin Peterek

IconPro GmbH, Aachen

Niels Rabbe

Atlas Copco Tools Central Europe GmbH, Essen

Max Riediger

ehemals Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie
IPT, Aachen

Dr. Alexandr Sadovoy

Siemens Industry Software GmbH, Berlin

Markus Schmidt

Magna PT International GmbH, Untergruppenbach

Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitäts-
management

Dr.-Ing. Alexander Schönberg

FFT Produktionssysteme GmbH & Co. KG, Fulda

Dr. Wolfgang Schultz

Griesheim

Charlotte Stehmar

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT,
Aachen

Lennart Stohrer

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitäts-
management

Dr.-Ing. Alexander Stratmann

Robert Bosch GmbH, Stuttgart

Anika Süß

Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Wirt-
schaftswissenschaften, Professur Unternehmens-
rechnung und Controlling

Alfredo Velazquez

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT,
Aachen

Michael Wagner

Q-DAS GmbH part of Hexagon, Weinheim

Stefan Weber

iqs Software GmbH, Bühl

Dominik Wolfschläger

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitäts-
management

Thomas Zweschper

edevis GmbH, Stuttgart

TEIL I

Fähige Mess- und Prüfprozesse etablieren

1	Messen und Prüfen als Kernaufgabe der Qualitätssicherung	3
2	Prüfplanung	11
3	Adaptive Prüfplanung	23
4	Geometrische Produktspezifikation – vom Konstruktionsmerkmal zur Messgröße	37
5	Validierung von Analyse-Software	79
6	Vom EMPB zum exzellenten Produkt- entstehungsprozess	91

1 Messen und Prüfen als Kernaufgabe der Qualitätssicherung

Robert H. Schmitt

1.1	Bedeutung der Fertigungsmesstechnik in produzierenden Unternehmen	5
1.2	Einordnung von Prüfprozessen in den betrieblichen Kontext	6
1.3	Nutzung von Messdaten in der Produktion	8

1.1 Bedeutung der Fertigungsmesstechnik in produzierenden Unternehmen

Die Fertigungsmesstechnik ist integraler Bestandteil der Qualitätssicherung in produzierenden Unternehmen. Lord Kelvins berühmtes Zitat „*I often say that when you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind; it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely in your thoughts advanced to the state of science, whatever the matter may be.*“ drückt die grundsätzliche Wichtigkeit von Messungen im Sinne einer Quantifizierung von physikalischen Zuständen und Gegenständen aus. Vor dem Hintergrund der Informatisierung und Virtualisierung wäre eine isolierte Betrachtung der Fertigungsmesstechnik in produzierenden Unternehmen jedoch deutlich zu kurz gegriffen. Der Megatrend der Digitalisierung in Wertschöpfungsketten befördert die Idee cyber-physischer Systeme, welche die Schaffung eines Digitalen Zwilling als Abbild vorhandener physischer Komponenten erlauben. Der Digitale Zwilling kann als Befähiger einer nachhaltigen Produktionstechnik dienen, wenn Ressourcen – oder allgemein: Objekte – miteinander vernetzt und mit Daten angereichert werden. Diese Daten können dann zu Informationen und Wissen verdichtet werden und daraus wiederum können konkrete Aktionen abgeleitet werden, die eine aktive Regelung von Wertschöpfungsketten ermöglichen. Eine Zielsetzung, die mit derartigen durchgängigen Datenketten verbunden ist, liegt in der Resilienz als erstrebenswerte Eigenschaft für effizient arbeitende Unternehmen. Denn in hoch vernetzten, komplexen Produktionssystemen haben unerwartete Störungen schnell weitreichende Auswirkungen, die durch objektivierbare Belege entlang der gesamten Wertschöpfungskette rasch erkannt sowie mit entsprechend schnell und richtig dosierten Gegenmaßnahmen ausgeglichen werden können. Über das Konstrukt der erhobenen Daten entsteht ein Rahmen, der über die Verbindung der Megatrends Digitalisierung, Informatisierung und Resilienz einen Bezug zur nachhaltigen Wertschöpfung im Sinne einer perspektivischen Life Cycle Sustainability aufbaut. Für die Daten, die aus reproduzierbaren und objektivierbaren Messungen gewonnen werden, bedeutet dies, dass sie in ausreichender Menge und Güte das zu beschreibende Konstrukt abbilden sowie zur richtigen Zeit am richtigen Ort erhoben und zur Verfügung gestellt werden müssen. Die organisatorische Einbettung in Qualitätssicherungs-

konzepte und Geschäftsprozesse eines Unternehmens ist deshalb essenziell für die Wirksamkeit der Messprozesse. Zum anderen müssen die organisatorischen Prozesse die Validität der Messdaten und die Eignung der Prüfmittel sicherstellen. Insgesamt kommt den organisatorischen Prozessen also eine hohe Bedeutung zu, die sich in den normativen Anforderungen widerspiegelt.

International bildet die Normenreihe der ISO 9000 ff. die normative Grundlage für die entscheidenden organisatorischen Prozesse aller (produzierenden) Unternehmen, die gerade auch mit Hinblick auf die Befähigung zur Zusammenarbeit von Unternehmen auf Basis einheitlicher Standards fundamental ist. Der Nachweis dieser Fähigkeiten ist ein Grund für eine entsprechende Zertifizierung z. B. nach ISO 9001 inklusive der dafür notwendigen externen Auditierung. Folgt man den Anforderungen von Qualitätsmanagementsystemen zur Erreichung der unternehmerischen Qualitätsziele auf den Feldern der Qualitätsplanung, -sicherung, -steuerung und -verbesserung, verbinden sich diese Aktivitäten mit der Messtechnik über den Begriff des Vertrauens entsprechend der Begriffsdefinition in der DIN EN ISO 9000:2015-11:

3.3.6 Qualitätssicherung

Teil des Qualitätsmanagements (3.3.4), der auf das Erzeugen von Vertrauen darauf gerichtet ist, dass Qualitätsanforderungen (3.6.5) erfüllt werden

In Abschnitt 3.11 der DIN EN ISO 9000:2015-11 werden alle „bestimmungsbezogenen Begriffe“ definiert, unter anderem auch die Begriffe „Messprozess“ sowie „Prüfung“:

3.11.5 Messprozess

Satz von Tätigkeiten zum Bestimmen eines Größenwertes

3.11.7 Prüfung

Inspektion

Bestimmung (3.11.1) der Konformität (3.6.11) mit festgelegten Anforderungen (3.6.4)

Die DIN EN ISO 9001:2015-11 ordnet den Vertrauensbegriff der Messtechnik der Begriffsdefinition zur messtechnischen Rückführbarkeit zu:

7.1.5.2 Messtechnische Rückführbarkeit^(NI)

Wenn die messtechnische Rückführbarkeit eine Anforderung darstellt, oder von der Organisation als

wesentlicher Beitrag zur Schaffung von Vertrauen in die Gültigkeit der Messergebnisse angesehen wird, muss das Messmittel:

- a) in bestimmten Abständen oder vor der Anwendung gegen Normale kalibriert, verifiziert oder beides werden, die auf internationale oder nationale Normale rückgeführt sind; wenn es solche Normale nicht gibt, muss die Grundlage für die Kalibrierung oder Verifizierung als dokumentierte Information aufbewahrt werden;
- b) gekennzeichnet werden, um deren Status bestimmen zu können;

Die Fußnote N1) enthält sogar einen normativen Verweis auf das internationale metrologische Wörterbuch ISO/IEC Guide 99, „International Vocabulary of Metrology – Basic and general concepts and associated terms“ (VIM):

N1) Nationale Fußnote: In der Messtechnik hat sich die Definition nach dem Internationalen Wörterbuch der Metrologie (VIM) für die Benennung „messtechnische Rückführbarkeit“ durchgesetzt. Äquivalent nach dem VIM ist auch der Begriff „metrologische Rückführbarkeit“.

Somit lässt sich festhalten, dass Mess- und Prüfprozesse für die Konformitätsprüfung von (Qualitäts-)Anforderungen unerlässlich sind, um einen essenziellen Beitrag zur Vertrauensfähigkeit von produzierenden Unternehmen und deren Geschäftsprozessen, insbesondere mit anderen Unternehmen, zu liefern. Dies ist in der Normenreihe ISO 9000 ff. verankert und kann durch Auditierung und Zertifizierung gegenüber Dritten zugesichert werden. Doch die Erfüllung normativer Forderungen steht nicht im Vordergrund. Vielmehr ist es Aufgabe der Messtechnik, objektive Daten über einen Sachverhalt dermaßen bereitzustellen, dass korrigierende Eingriffe in Prozesse bewusst, kontrolliert und dokumentiert vorgenommen und ihre Auswirkungen quantisiert werden können. Genau dieser Wandel der Auffassung, Messtechnik nicht allein als Dokumentation des Zustands eines Ergebnisses eines Prozesses zu verstehen, sondern als Datenquelle entlang komplexer Wertschöpfungsketten, ist die Grundlage der Weiterentwicklung eines reaktiven Qualitätsmanagements hin zu einem prädiktiven oder gar präskriptiven Qualitätsmanagement. Dann wird Messtechnik Bestandteil der Aufklärung auch latenter Sachverhalte und damit Bestandteil der Wissen generierenden „Quality Intelligence“.

1.2 Einordnung von Prüfprozessen in den betrieblichen Kontext

Prüfprozesse stellen die Konformität (oder Nichtkonformität) von Qualitätsanforderungen sicher. Diese Anforderungen orientieren sich an Merkmalen der zu prüfenden Objekte. Unter Merkmalen versteht die DIN ISO 9000:2015-11 Folgendes:

3.10.1 Merkmal

kennzeichnende Eigenschaft

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein Merkmal kann inhärent oder zugeordnet sein.

Anmerkung 2 zum Begriff: Ein Merkmal kann qualitativer oder quantitativer Natur sein.

Anmerkung 3 zum Begriff: Es gibt verschiedene Klassen von Merkmalen, z. B.:

- a) physikalische (z. B. mechanische, elektrische, chemische oder biologische Merkmale);*
- b) sensorische (z. B. bezüglich Geruch, Berührung, Geschmack, Sehvermögen, Gehör);*
- c) verhaltensbezogene (z. B. Höflichkeit, Ehrlichkeit, Aufrichtigkeit);*
- d) zeitbezogene (z. B. Pünktlichkeit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Kontinuität);*
- e) ergonomische (z. B. physiologische oder auf Sicherheit für den Menschen bezogene Merkmale);*
- f) funktionale (z. B. Spitzengeschwindigkeit eines Flugzeuges).*

Ein Qualitätsmerkmal bezeichnet demnach das inhärente Merkmal eines Objekts, das sich auf eine Anforderung bezieht. Im Kontext der industriellen Fertigungsmesstechnik erscheinen einige Merkmale aus Anmerkung 3 der vorangehend genannten Begriffsdefinition mittelbar und andere unmittelbar. Bild 1.1 ordnet die Merkmale in qualitative und quantitative bzw. variable Merkmale ein. Häufig wird bei einer ausschließlich technologisch geprägten Sicht vernachlässigt, dass qualitative (oder attributive) Merkmale auch über Sinneswahrnehmungen hinsichtlich des Vorhandenseins bestimmter Merkmale, wie z. B. Kratzer, Lunker oder bearbeitungstechnisch erzeugte Geometriemerkmale, erfasst und aufgrund von Erfahrungswissen oder Vergleichsmustern beurteilt werden können. Das Nachempfinden dieser zunächst nichtmaßlichen Prüfung durch technische Systeme, wie z. B. bestimmte Arten der Bildverarbeitung in Verbindung mit Mustererkennungs-

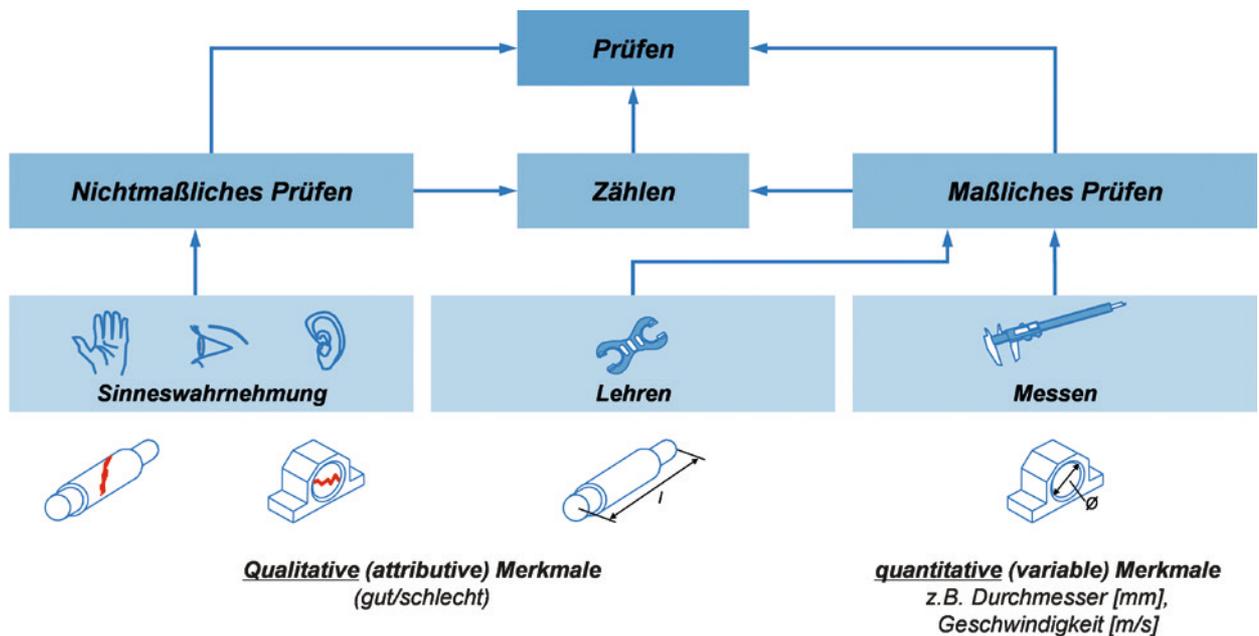


Bild 1.1 Einordnung von Prüf- und Messprozessen als Teil der industriellen Qualitätssicherung

algorithmen, erfordert aktuell den Einsatz leistungsfähiger Systeme, wobei insbesondere Fragen der Unsicherheit, Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit im messtechnischen Sinne besondere Herausforderungen darstellen. Die Prüfung quantitativer Merkmale, wie z.B. Längenmaße, bedarf dagegen einer Messung. Diese unterscheidet sich grundsätzlich dadurch, dass die Messung repräsentationstheoretisch eine strukturtreue oder homomorphe Abbildung eines empirischen Relativs in ein numerisches Relativ ist. Ein empirisches System lässt sich dabei unter bestimmten Bedingungen durch ein numerisches System präsentieren. Die maßliche Prüfung liefert also eine quantifizierte Aussage über ein Merkmal, z.B. die Größe der Abweichung von der Spezifikation. Das Einhalten maßlicher Merkmale innerhalb festgelegter Grenzen kann auch über Lehren, die eine materielle Verkörperung dieser Grenzen darstellen, maßlich beurteilt werden, jedoch ohne eine Quantifizierung des realen Maßes. Grundsätzlich ist dem Messprozess (im Sinne der „Wahrnehmung“ des Qualitätsmerkmals) ein Prüfprozess nachgeschaltet, in dem eine Entscheidung hinsichtlich einer „gut“/„schlecht“-Aussage in Bezug auf die Konformität getroffen wird. In der Regel müssen für ein Bauteil mehrere qualitative und quantitative Merkmale geprüft werden, sodass die Konformität bzw. Nichtkonformität für die einzelnen Merkmale getrennt bewertet werden muss. Die Zählung stellt eine Sonderform der Prüfung dar, denn einerseits kann die Anzahl von Elementen oder Merkmalen durch Abzählen, also in diskreten Schritten, bestimmt werden, und andererseits kann die Aufgabe einer Zählung durch

andere messtechnische Lösungen substituiert werden. Ein Beispiel hierfür ist die Wägezählung, bei der die Anzahl von meist gleichartigen Elementen durch Bestimmung der Gesamtmasse bestimmt wird.

Werden Prüfprozesse und die dafür nötigen Messmittel in die betrieblichen Abläufe integriert, müssen der Ort der Messung sowie die Eintaktung in die zeitlichen Abläufe der Produktionsprozesse beachtet werden. Bild 1.2 zeigt hierfür fünf verschiedene Integrationsstufen:

- 1. Fertigungsferne Messung:** Hier erfolgt die Messung mit geringem oder ohne zeitlichen Zusammenhang mit der Fertigung und in der Regel im Messlabor. Diese Messung im Messlabor ermöglicht in der Regel streng kontrollierte Bedingungen, z.B. im temperaturstabilisierten und schwingungs isolierten Messraum.
- 2. Fertigungsnahe Messung:** Die Messung erfolgt in örtlicher Nähe zu Fertigungslinien, z.B. neben den Linien. Diese Nähe ermöglicht im Gegensatz zur fertigungsfernen Messung kurze Transferzeiten für die Messobjekte, sodass auch teilweise eine taktgesteuerte bis zu 100%-Prüfung ermöglicht werden kann. Für den fertigungsnahe Einsatz können die Messmittel auch teilautomatisiert betrieben werden.
- 3. Inline-Messung:** Für eine Inline-Messung werden die Messmittel in die Linie integriert und im Produktionstakt betrieben, sodass eine 100%-Prüfung ermöglicht wird. Zum Teil werden die Messergebnisse in den Produktionsablauf rückgekoppelt.
- 4. Maschinenintegrierte Messung:** Das Messmittel wird in die vorhandene Bearbeitungsmaschine integriert.



Bild 1.2 Die fünf Stufen der Messtechnikintegration

Für die Messung kann das zu prüfende Werkstück in der Maschine eingespannt bleiben, jedoch wird für diese Dauer die Bearbeitung unterbrochen. Dies hat Vorteile, z.B. bei der Korrekturbearbeitung, da Wechsellagerfehler vermieden werden können.

- 5. **In-Prozess-Messung:** Im Gegensatz zur maschinenintegrierten Messung erfolgt die Messung bei der In-Prozess-Messung maschinenintegriert und während der Bearbeitung.

Der zunehmende Integrationsgrad von der ersten bis zur fünften Stufe geht mit einer abnehmenden Reaktionszeit einher, wenn die Fertigungsprozesse auf Basis der Messergebnisse geregelt werden sollen.

Die zeitnahe Nutzung der Messergebnisse für die Regelung hat auch Implikationen auf die Auswahl der Messmittel. Hier haben optische Messverfahren Vorteile, zum einen da sie eine hohe Informationsdichte pro Zeit bieten, d.h., dass in kurzer Zeit eine hohe Anzahl an Messdaten generiert werden kann, zum anderen weil sie zerstörungsfrei sowie berührungsfrei arbeiten und so weniger empfindlich für Umgebungseinflüsse, wie z.B. Temperaturschwankungen, elektromagnetische Felder oder mechanische Schwingungen, sind. Teil III, „Valide Messdaten unter Produktionsbedingungen gewinnen“, dieses Buches beschreibt verschiedene optische Messverfahren wie z.B. die Weißlichtinterferometrie, die industrielle Bildverarbeitung, die Photogrammetrie oder die optische Kohärenztomographie.

Taktile Messmittel haben jedoch nach wie vor ihre Berechtigung. Sie sind für zahlreiche Aufgaben der Fertigungsmesstechnik der Goldstandard und aufgrund der herausfordernden Kalibrierung optischer Messmittel nur schwer durch diese zu ersetzen. Taktile Aufnehmer finden sich häufig in Standardmessmitteln wie z.B. Handmessmitteln, Lehren oder auch in der Koordinatenmesstechnik. Diese sind in vielen Bereichen unersetzbar, unter anderem wegen der geringen Messunsicherheit bei vielen Prüfmerkmalen und da optische Messprinzipien für man-

che Messstrategien nicht geeignet sind. Zum Beispiel ist die seitliche Antastung mit optischen Verfahren nicht möglich.

1.3 Nutzung von Messdaten in der Produktion

Das primäre Ziel der Fertigungsmesstechnik ist die Prüfung von Qualitätsmerkmalen der produzierten Güter im Sinne der Qualitätssicherung. Dies gewährleistet zum einen die Konformität der Güter mit den Qualitätsparametern sowie die Identifizierung von Ausschuss. Der praktischen Unmöglichkeit der Verfolgung aller produzierten Einheiten im Einzelnen, die sich aufgrund der zunehmenden Produktionsvolumina im Zuge der Massenfertigung ergab, trug die Entwicklung der Qualitätskontrolle auf Basis von statistischen Verfahren in den 1930er Jahren Rechnung. Diese legten den Grundstein zur gezielten Steuerung der Prozesse und die daraus resultierende Reduktion des Ausschussaufkommens. Hiermit wurde der Wandel von einem rein reaktiven Qualitätsansatz (Qualitätskontrolle) hin zu einem proaktiven Qualitätsansatz (Qualitätssicherung) eingeläutet. Bereits zu Beginn der 1950er Jahre gewannen Fehlerkosten als Kontroll- und Steuerungskennzahlen vermehrt an Bedeutung. Im Jahr 1956 wurde der Ansatz der Total Quality Control (TQC) entwickelt, welcher auf der Erkenntnis basiert, dass Fehler in den frühen Phasen der Produktentstehung zu hohen Kosten im späteren Verlauf führen. Entsprechend wurde im Sinne einer stetigen Optimierung der Prozesslandschaft ein systematisches Vorgehen entwickelt, welches als Deming-Zyklus (PDCA) ein Basiswerkzeug der kontinuierlichen Verbesserung darstellt. Die darauf beruhenden Initiativen zur Verbesserung der Kundenzufrieden-

denheit, wie z.B. die Six-Sigma-Methode, basieren auf datengetriebenen, statistischen Ansätzen und einem projektmanagementorientierten, systemischen Ansatz. Offenkundig sind all diese Schritte ohne Weiterentwicklung der messtechnischen Grundlagen nicht umsetzbar.

Der Begriff „Industrie 4.0“ steht seit 2011 nach der industriellen Einführung der Dampfmaschine (1. Industrielle Revolution), der Massen- und Fließbandfertigung (2. Industrielle Revolution) und der Einführung rechnergestützter Steuerungen und Roboter (3. Industrielle Revolution) durch die Umsetzung cyber-physischer Systeme für die „4. Industrielle Revolution“. Durch die vertikale Vernetzung eingebetteter Systeme mit Produktionsmaschinen und deren horizontale Vernetzung zu verteilten, in Echtzeit steuerbaren Wertschöpfungsnetzwerken, ergeben sich für die Qualitätssicherung und damit auch für die Messtechnik neue Potenziale, insbesondere in den Bereichen der Datenqualität, -verarbeitung und -sicherung. Der anhaltende technologische Fortschritt befähigt die Erweiterung bestehender Methodenbaukästen um die Generierung und Analyse großer Datenmengen unter Zuhilfenahme fortschrittlicher Ansätze, beispielsweise aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz. Die Fertigungsmesstechnik hält dementsprechend technologisch und organisatorisch Schritt und erlaubt perspektivisch die Wiedererlangung der zeitweise verloren gegangenen Fähigkeit der datentechnischen Nachverfolgung und Modellierung von individuellen Produkten. Im Kontext der datengetriebenen Produktion hat die Fertigungsmesstechnik jedoch an Wichtigkeit über die Qualitätssicherung im engeren Sinne hinaus gewonnen. Zu nennen sind hier folgende Aspekte:

- **Automatisierter Messdatentransfer:** Im Zuge der Entstehung des Industrial Internet of Things (IIoT)-Paradigmas wurden zahlreiche Schnittstellen und Kommunikationsprotokolle entwickelt. Ansätze wie z.B. Representational State Transfer (REST) bieten – auch über die Unternehmensgrenzen hinweg – universelle Schnittstellen für den Datentransfer, da REST eine hohe Kompatibilität mit HTTP-Diensten hat. Das Constrained Application Protocol (CoAP) erweitert diesen Ansatz speziell auf eingebettete Systeme. Als weiteres IIoT-Protokoll hat sich Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) etabliert. Über eine Publish-Subscribe-Struktur können sich mehrere Clients mit einem Broker verbinden und Daten auf strukturierte Weise in sogenannten Topics austauschen. Dabei kommt ein vergleichsweise geringer Packet Overhead der Nutzung für verschiedenste Messdatentransfers zugute. Mit diesen verschiedenen Möglichkeiten fällt es leicht, Messdaten über Systemgrenzen hinweg flexibel auszutauschen.
- **Drahtlose Konnektivität:** Funkübertragungstechnologien wie Bluetooth und insbesondere 5G ermöglichen

eine allverfügbare Konnektivität und damit einen Zugriff auf Daten unabhängig vom Ort. Dies ermöglicht eine Flexibilität im Einsatz von Sensorik und Aktorik ohne Kompromisse, da 5G potenziell die Eigenschaften einer verkabelten Datenverbindung bietet. Hierdurch können drahtlose Messsysteme ortsveränderlich eingesetzt werden, entweder als Retrofit oder für den temporären Einsatz. Auf der Datennutzungsseite können die Empfänger der Messdaten ebenfalls flexibel eingesetzt werden, z.B. in Form von mobilen Produktionsmitteln wie AGVs oder mobilen Robotern. Der Zugewinn an Flexibilität kann sich in kürzeren Rüstzeiten, kürzeren Wegzeiten und insgesamt in einer Kostensenkung in der Produktion auswirken. Insbesondere die Zugänglichkeit der Messdaten ist über 5G im Vergleich mit Bluetooth oder felddbusbasierter Kommunikation ein echter funktionaler Zugewinn.

- **Digital Twinning:** Messdaten aus der Prozessüberwachung sowie aus der Qualitätssicherung können automatisch erhoben und in Digitalen Zwillingen fusioniert werden. Mit dem automatisierten Messdatentransfer und der drahtlosen Konnektivität ist die Verfügbarkeit garantiert und lediglich die Datenspeicherung und Semantik stellt eine Herausforderung dar. Doch über Angebote wie International Data Spaces und Asset Administration Shell (AAA 4.0) gibt es erste standardisierte Ansätze, an denen man sich orientieren kann. Hiermit lassen sich Bauteil- und Prozessdaten lebenszyklusorientiert dokumentieren und nachverfolgen. Digitale Zwillinge sind überdies sehr hilfreich bei der Visualisierung und bei der Identifikation von Prozessabweichungen.
- **Statistische Auswertemethoden und maschinelles Lernen:** Schlussendlich hat auch die (informations-)technische Entwicklung nicht vor der Auswertung von Mess- und Prozessdaten Halt gemacht. Natürlich kann man auch heutzutage noch Daten für eine SPC erheben – mit den vorangehend genannten Entwicklungen geht dies sogar leichter denn je. Auf der Auswerteseite haben sich jedoch die statistischen Verfahren drastisch verändert und der Fokus der wesentlichen Entwicklungen der letzten Jahre lag auf Verfahren des maschinellen Lernens. Im Bereich der Prozessoptimierung hat sich das sogenannte Process Mining etabliert. Angebote für fertige Auswertemodule zum Einsatz im Produktionskontext sind sowohl für das maschinelle Lernen im Allgemeinen als auch für das Process Mining bereits kommerziell erhältlich.

Durch die vorangehend genannten Entwicklungen hat die Messtechnik im Kontext einer datengetriebenen Produktion an Bedeutung und Impuls gewonnen. Erschien in der Vergangenheit die Fertigungsmesstechnik als zusätzliche

I

Aktivität zur eigentlichen Produktion als nicht wertschöpfend, hat sich die der Anwendungsradius von Messdaten und den daraus gewonnenen Informationen längst über die reine Qualitätssicherung hinaus ausgedehnt. Ergänzend zum Technologieschwerpunkt der Industrie 4.0 hal-

ten Themen wie Nachhaltigkeit, Resilienz, aber auch die Menschenzentrierung Einzug in die Art, wie wir Wertschöpfung betreiben, und macht damit die verlässliche Bereitstellung objektiver Daten zu ihrem integralen Bestandteil.

2 Prüfplanung

Robert Hofmann, Sophie Gröger, Anika Süß

2.1	Definition und Ziele	13
2.2	Grundlegende Begriffe	13
2.3	Messen und Prüfen im Produktleben – Prüfzwecke	14
2.4	Ablauf der Prüfplanung	15
2.4.1	Auftrag und Prüfobjekt	16
2.4.2	Prüfmerkmalsdefinition	16
2.4.3	Fertigungsintegration, Prüfumfang, Prüfort und -mittel	17
2.4.4	Prüfmittelüberwachung, -kalibrierung und -rückführung, Eignungsnachweis	19
2.4.5	Dokumentation und Weiterverarbeitung der Daten	20
2.4.6	Reaktionspläne, Prüfplanüberwachung, Freigabe	20
2.5	Wirtschaftliche Relevanz der Prüfplanung	21
2.6	Trends und Perspektiven der Prüfplanung	22
2.7	Danksagung	22

2.1 Definition und Ziele

Es ist die übergeordnete Aufgabe der Prüfplanung, alle notwendigen Vorbereitungen zu treffen und Festlegungen zu erarbeiten, die zur Durchführung von Qualitätsprüfungen notwendig sind. Die Prüfplanung ist also ein interdisziplinärer Prozess, der die Basis für erfolgreiche und effiziente Prüfungen legt und Einflüsse auf alle Phasen des Produktlebenszyklus haben kann. Dafür werden Informationen verschiedener Fachbereiche benötigt und in einer methodischen Herangehensweise zu Festlegungen verarbeitet. Die Hauptziele der Prüfplanung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- vollständige Definition aller zur Durchführung von Prüfungen notwendigen Festlegungen und zu absolvierende Schritte
- Sicherstellung wirtschaftlicher Prüfungen als Beitrag zur Senkung der Qualitätskosten
- Minimierung des Einflusses auf Produktionsdurchlaufzeiten
- transparente Entscheidungswege
- nachvollziehbare und eindeutige Dokumentation
- Berücksichtigung übergeordneter Vorgaben (Normen, Gesetze, Verträge etc.) und Leitmotive (Null-Fehler-Strategie, risikobasierende Ansätze etc.)

Innerhalb der Prüfplanung haben sich W-Fragen als Grundlage etabliert, deren Beantwortung Bestandteil jedes vollständigen Prüfplanungsprozesses ist. Diese sind in Bild 2.1 aufgezeigt. Die sind die jeweiligen Festlegungen überwiegend voneinander abhängig und beeinflussen sich gegenseitig.

Für den Ablauf der Prüfplanung werden mehrere wesentliche Informationen benötigt. Dazu gehört das Wissen über die funktionalen Anforderungen des zu prüfenden Produktes, sicherheitstechnische Aspekte, der intendierte Fertigungsablauf sowie die zur Verfügung stehende Prüfmittel. Insofern sind die Technische Produktspezifikation (Technische Zeichnung, Leistungsdaten etc.), existierende Qualitätsdokumente (Berichte (auch aus Vorgängerpro-

dukten), Fähigkeitsuntersuchungen etc.), Fertigungsdokumente (Ablaufplan etc.) sowie Datenblätter der zur Verfügung stehenden Prüfmittel essenzielle, die Prüfplanung unterstützende, Dokumente.

2.2 Grundlegende Begriffe

Der Vorgang des Prüfens beinhaltet die Feststellung, ob ein oder mehrere Merkmale vorgegebene Anforderungen erfüllen (DIN 1319-1). Dabei wird Prüfen als Oberbegriff verstanden, welcher in einerseits maßliches, objektives und andererseits nichtmaßliches, subjektives Prüfen unterteilt wird. Bild 2.2 zeigt die grundsätzliche Unterscheidung der Prüfarten.

Bei nichtmaßlichen subjektiven Prüfungen wird der Abgleich des Ist- mit dem Soll-Zustand zum Beispiel durch Sehen, Tasten oder Hören des Prüfenden entweder direkt oder indirekt (unter Verwendung eines Hilfsmittels wie zum Beispiel eine Kamera) vorgenommen. Zwar laufen derartige Prüfungen oft verhältnismäßig schnell und unkompliziert ab, sind aber wesentlich vom Prüfer abhängig und können somit hohen Schwankungen unterliegen.

Maßliches Prüfen verlangt stets nach einem oder mehreren Hilfsmitteln, um zur gewünschten Aussage zu gelangen. Es wird in Messen und Lehren unterschieden.

Lehren beschreibt den Vorgang, mittels geeigneter Werkstücke, die die vorgegebenen Toleranzgrenzen repräsentieren, sogenannter „Lehren“, zu bestimmen, ob sich ein Ist-Wert innerhalb dieser Grenzen befindet. Dabei wird zum Beispiel mittels einer Paarungslehre geprüft, ob sich die Gutseite der Lehre problemlos mit dem entsprechenden Gegenstück des Prüfobjektes paaren lässt, sodass die Maximal-Maß-Bedingung eingehalten und das Merkmal als konform bewertet werden kann. Sollte sich die Ausschuss-Seite einer Lehre ebenso gut fügen lassen, so ist die Minimal-Maß-Bedingung unterschritten und somit das Merkmal als nichtkonform zurückzuweisen. Diese Prüfarten liefern also nur eine Aussage über die Konfor-

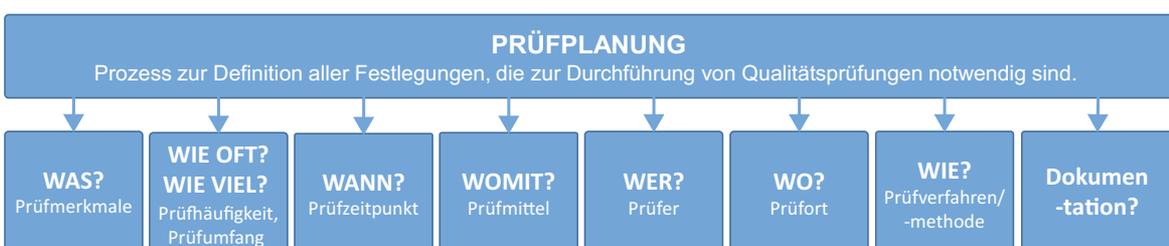


Bild 2.1 Definition und W-Fragen der Prüfplanung

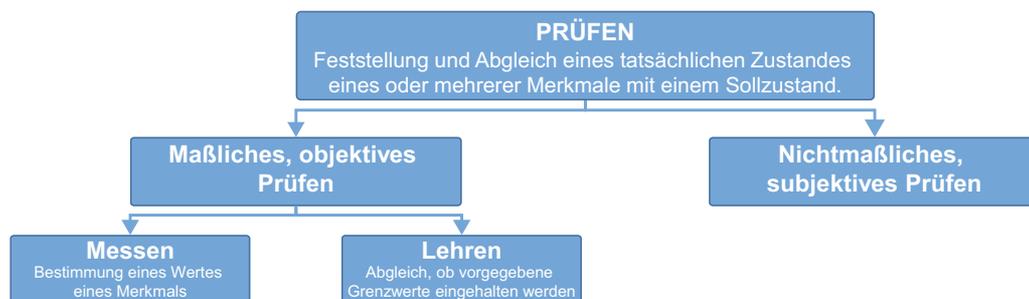


Bild 2.2 Grundsätzliche Unterscheidung von Arten des Prüfens

mität beziehungsweise Nichtkonformität und keine weiterführenden Informationen über den exakten Wert bzw. Größe des Merkmals oder die Höhe der Toleranzübertretung. Lehren bietet die Möglichkeit, sehr schnell, auch innerhalb der Herstellungsprozesskette in Form von Werkerselbstprüfungen, die Konformität der gefertigten Merkmale zu prüfen und entsprechende Entscheidungen (Weiterführung der Prozesse oder weitere Untersuchungen aufgrund Nichtkonformität) abzuleiten. Sie sind insofern stets funktionsorientiert und nicht fertigungsprozessorientiert anzuwenden.

Dahingegen ist es Ziel des Messens, den tatsächlichen Ist-Wert der Ausprägung eines Merkmals zu erfassen. Dafür werden Messgeräte benötigt, die sich in bestimmten Kriterien (zum Beispiel Auflösung und Messunsicherheit) für die Durchführung der gestellten Messaufgabe eignen. Der ausgegebene Ist-Wert wird dem Soll-Wert inklusive dessen Toleranzen gegenübergestellt und somit über die Konformität des Merkmals entschieden. Es ergeben sich zahlreiche Anwendungsbereiche für das Messen, welches sowohl funktions- als auch fertigungsorientiert eingesetzt wird.

2.3 Messen und Prüfen im Produktleben – Prüfzwecke

Bei der Prüfplanung sind üblicherweise beginnend bei der Planung, über die Arbeitsvorbereitung, Durchführung, Auswertung bis abschließend zu Verarbeitung von Prüfungen verschiedene Mitarbeiter unterschiedlicher Fachbereiche beteiligt. Zudem sind die erzeugten Daten für verschiedene Anwender relevant. Prüfungen finden entlang des gesamten Produktlebens statt, wobei sich deren Durchführung, und somit deren Planung, wesentlich von

einander unterscheiden können. Bild 2.3 liefert eine Übersicht mit beispielhaften Prüfungen innerhalb des Produktlebens, in denen sich Festlegungen der Prüfplanung wesentlich voneinander unterscheiden, wie zum Beispiel den Prüfmerkmalen, Zeitpunkten, Orten, Häufigkeiten etc.

Es ist zu Beginn der Prüfplanung also zu berücksichtigen, aus welchem Stadium des Produktlebens die Prüfaufgabe stammt. Zudem sind übergeordnete Rahmenbedingungen zusammenzustellen, wie zum Beispiel Vertrags- bzw. Auftragsunterlagen oder unternehmensspezifische Leitmotive (zum Beispiel Null-Fehler-Strategie), welche Einfluss auf die Prüfplanung nehmen. Die in Bild 2.3 dargestellten Prüfungen lassen sich, in Abhängigkeit der angestrebten Verwendung des erzeugten Prüfergebnisses, generell den zwei übergeordneten Prüfzwecken funktionsorientiert und fertigungsorientiert zuordnen.

Es lassen sich grundsätzlich funktions- von fertigungsorientierten Prüfzwecke voneinander unterscheiden.

Funktionsorientierte Prüfungen fokussieren den Nachweis der Konformität der seitens der Entwicklung oder Auftraggeber definierten Qualitätsmerkmale, welche in der Technischen Produktspezifikation oder in Vertragsunterlagen festgelegt werden. Sie sind insofern von weitreichender Bedeutung für das Unternehmen und dessen Prüfplanung, da es ein wesentliches Ziel ist, Qualitätsmängel offen zu legen und sicherzustellen, dass nur konforme Produkte ausgeliefert werden. Prüfungen zur Konformitätsbewertung eines Produktes sind zumeist am Ende der Prozesskette bzw. nach Vollendung der betrachteten Eigenschaften angesiedelt (Prüfzeitpunkt), wobei die zu prüfenden Eigenschaften (Prüfmerkmale) sowie Prüfhäufigkeiten oft vertraglich festgehalten wurden.

Fertigungsorientierte Prüfungen zielen darauf ab, Wissen über das tatsächliche Verhalten eines Fertigungsprozesses zu erhalten. Derartig erzeugte Daten werden genutzt, um zum Beispiel Einstellungen innerhalb der Fertigungs-

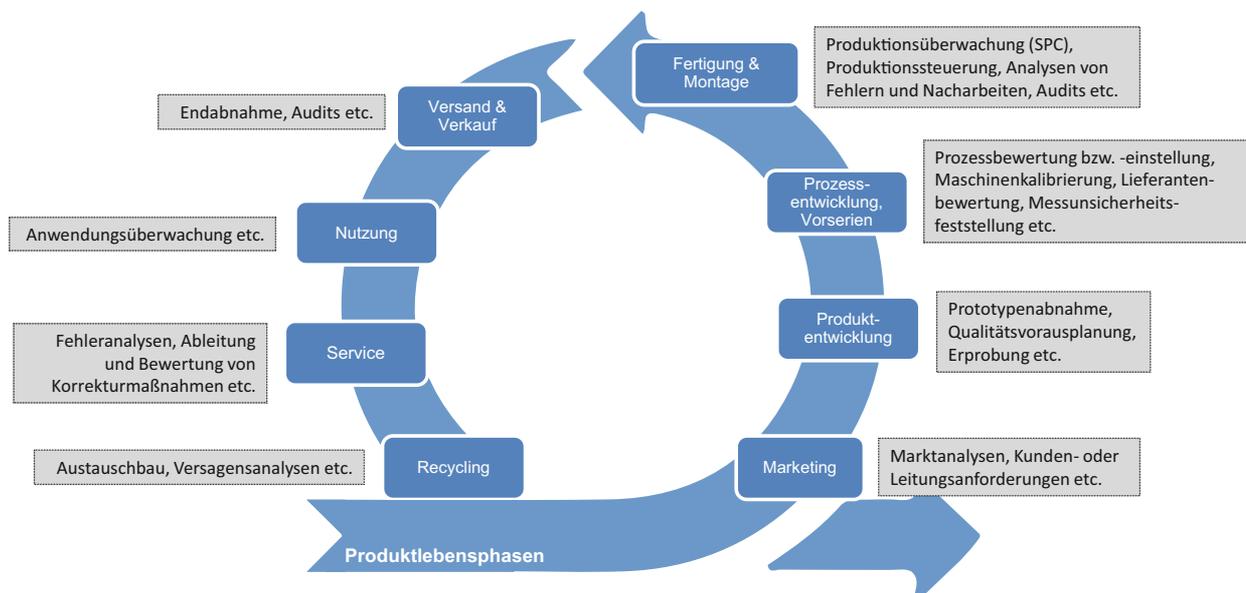


Bild 2.3 Übersicht über beispielhafte, verschieden ausgerichtete Prüfungen im Produktleben

maschine zu optimieren oder diese zu steuern. Fertigungsorientierte Prüfungen gewährleisten vordergründig die Effizienz von Prozessketten und sind insofern überwiegend im unternehmensinternen Interesse. Fertigungsprozesskontrollen rufen überwiegend hohe Prüfhäufigkeiten und prozesskettennahes Prüfen (Prüfzeitpunkt, Prüfort) auf, da die damit durchzuführenden Analysen, wie zum Beispiel statistische Prozesskontrollen, zumeist von einem hohen Datenvolumen profitieren. Zu deren Planung sind verfügbare Informationen und Daten, die die geplanten Fertigungsverfahren betreffen, heranzuziehen. Diese können auch produktunabhängig sein, wenn zum Beispiel aus der Vergangenheit bekannt ist, dass eine Mehrzahl von Reklamationsfällen auf bestimmte Fertigungsverfahren oder Abläufe zurückgeführt werden können. Weitere wichtige, fertigungsverfahrensorientierte Dokumente und Informationen sind Ergebnisse der Statistischen Prozesskontrolle, Maschinenfähigkeitswerte oder die Erkenntnisse aus Vorserien und Prototypenprozesse.

Der angestrebte Zweck einer Prüfung nimmt wesentlichen Einfluss auf die Durchführung der Planung. Den Zweck einer Prüfung zu identifizieren unterstützt den Prozess der Prüfplanung wesentlich, indem so Festlegungen von Prüfplanungsinhalten vorgeben bzw. die möglichen Optionen beschränkt werden.

2.4 Ablauf der Prüfplanung

Generell hat sich eine sukzessive Abfolge der Abarbeitung der notwendigen Prüfplanungsprozesse etabliert, welche in Bild 2.4 dargestellt und in den folgenden Abschnitten näher beschrieben wird.

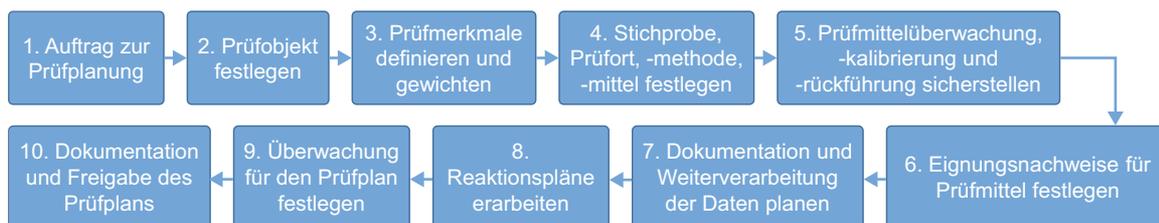


Bild 2.4 Genereller Ablauf des Prüfplanungsprozesses

2.4.1 Auftrag und Prüfobjekt

Der Prüfplanungsprozess startet mit dem Auftrag dazu, der zum Beispiel durch die Unternehmensführung, Projektleitung oder Qualitätsmanagementleitung erfolgen kann. Auslöser für Prüfungen können unter anderem externe und vertragliche Kundenforderungen, normative Festlegungen und interne Vorgaben über die Prüfung tolerierter Merkmale oder übergeordnete Unternehmensmotive, wie zum Beispiel hohe Qualitätsstandards, sein. Mit dem Auftrag zur Prüfung ist die Festlegung des Prüfobjektes eng verbunden. Es können dabei nicht nur zu fertigende Produkte geprüft werden, sondern ebenso auch Fertigungs- oder Messhilfsmittel (Halterungen etc.), Musterbauteile oder Prüfmittel selbst. Weiterhin sind die übergeordneten Qualitätsziele des Unternehmens aus dem zugehörigen Qualitätsmanagementsystem zu übernehmen, da diese sich gegebenenfalls auf Festlegungen der Prüfplanung auswirken. Derartige Qualitätsziele können unter anderem ein gesteigertes Qualitätsbewusstsein, Null-Fehler-Strategie oder die Forcierung digitaler Produktionsweisen sein.

2.4.2 Prüfmerkmalsdefinition

Im nächsten Schritt erfolgt die Definition der zu prüfenden Merkmale sowie die daran gekoppelte Ableitung der Messgrößen. Bild 2.5 zeigt den Ablauf zur Prüfmerkmalsdefinition.

Qualitätsmerkmale erkennen

Zunächst muss das Prüfobjekt hinsichtlich möglicher Prüfmerkmale analysiert werden. Dazu werden in einem ersten Schritt alle Dokumente geprüft, in denen Qualitätsmerkmale, welche später als Prüfmerkmale definiert werden können, aufgeführt sind. Dazu gehört insbesondere die Technische Produktspezifikation und die dazu gehörende Technische Zeichnung, die alle funktionsorientierten Merkmale beinhaltet. Für umfangreichere Konstruktionen und Zeichnungen bieten sich Methoden zur strukturierten Durchsicht der Unterlagen, zum Beispiel anhand der Unterteilung in Planquadrate, an. Die

tolerierten Merkmale werden folglich als Prüfmerkmal übernommen und fortlaufend nummeriert (umgangssprachlich: gestempelt). Das Ergebnis daraus ist die Prüfmerkmalsliste für die funktionsorientierten Prüfungen.

Fertigungskette analysieren

Zur Definition fertigungsbezogener Prüfmerkmale ist ein erhöhter Aufwand und die Durchsicht sowie Auswertung mehrerer Dokumente notwendig. So liefern verschiedene Qualitätsdokumente von Vorgängerprojekten Aufschluss über Prozessschritte, denen ein erhöhtes Aufkommen von Reklamationen des Kunden oder Werker selbstprüfungen zugeordnet werden können. Weiterhin zeigen vorliegende Prozessregelkarten die Trends von Fertigungsprozessen, sodass besonders schwankungsanfällige Prozesse und Merkmale identifiziert werden können. Zudem helfen Informationen aus Datenblättern von Maschinen und der Maschinenkalibrierungen, kritische Prozesse zu finden und folglich für diese durch die Definition von Prüfmerkmalen die Prüfplanung zu initiieren. Kritisch ist ein Fertigungsprozess in diesem Sinne, wenn aufgrund dessen angegebenen Unsicherheiten zweifelhaft ist, ob die zu erreichenden Toleranzen eingehalten werden können. Eine weitere Quelle für prüfplanungsrelevante Informationen mit Fertigungsprozessbezug können Simulationen der Verfahren liefern, wie zum Beispiel Computer Aided Manufacturing oder Spritzgussimulationen. Mithilfe derer werden kritische Bereiche und somit Merkmale identifizierbar, die in der realen Produktion zu erhöhten Schwankungsanfälligkeit neigen.

Prüfmerkmale und Messgrößen ableiten

Im nächsten Schritt ist zu prüfen, inwiefern Messgrößen von den Prüfmerkmalen abzuleiten sind. Das kann notwendig sein, wenn das Merkmal zum Beispiel nicht oder nur erschwert messbar ist, was beim Prüfen elektronischer Merkmale oder bei zerstörenden Prüfungen auftreten kann. Die Messgröße steht dabei in einem bekannten Zusammenhang zum Prüfmerkmal. Für geometrische Prüfungen entspricht die Messgröße generell dem Prüfmerkmal.

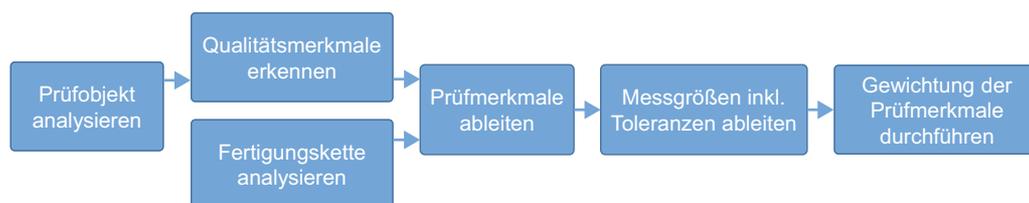


Bild 2.5 Ablauf zur Prüfmerkmalsdefinition

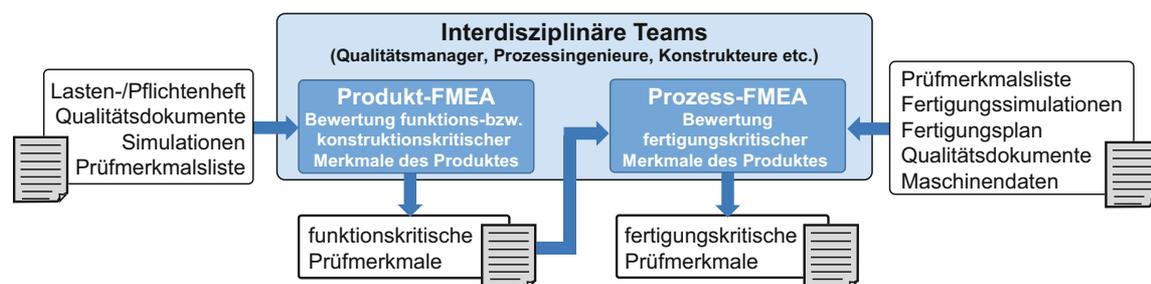


Bild 2.6 Prüfmehrpriorisierung durch FMEA

Gewichtung der Merkmale durchführen

Die Gewichtung und Risikopriorisierung eines Prüfmerkmals ist ein Schritt, der sich wesentlich auf folgende Prüfplanungsschritte auswirkt. Dabei werden besondere Merkmale gekennzeichnet, die folglich innerhalb der Prüfplanung priorisiert zu behandeln sind. Als besonders werden generell Merkmale bezeichnet, welche entweder wesentlichen Einfluss auf die Funktions- und Leistungstauglichkeit, Erscheinungsform oder Fertigung des Produktes besitzen oder durch Verordnungen oder Gesetze als solche gekennzeichnet werden müssen (IATF 16949). Zur Identifikation besonderer Prüfmerkmale eignen sich die verschiedenen Formen der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse, kurz FMEA, gemäß VDA Handbuch (VDA-FMEA 2019). Es ist die Wahrscheinlichkeit des Eintretens, die Wirkung für den Kunden sowie die Wahrscheinlichkeit des Entdeckens eines Fehlers durch eine Risikoprioritätszahl zu bewerten. Es werden grundsätzlich die Produkt-FMEA sowie Prozess-FMEA und davon abgeleitete Spezialisierungen unterschieden. Generell kann die FMEA also genutzt werden, um Risiken zu identifizieren und Verknüpfungen zu Prüfmerkmalen aufzustellen. Zu deren Erarbeitung sind interdisziplinäre Teams notwendig, die sich zum Beispiel aus Experten der Bereiche Konstruktion, Qualitätsmanagement, Prozessplanung zusammensetzen. Bild 2.6 zeigt den Einsatz der Produkt- und Prozess-FMEA zur Prüfmehrpriorisierung.

Die Produkt-FMEA, oft auch Design- oder Konstruktions-FMEA genannt, bezieht sich auf die qualitativen Anforderungen des Produktes, welche sich zum Beispiel aus dem Lastenheft ergeben. Besonders funktionskritische Anforderungen einer Konstruktion beziehungsweise des fertigen Produktes werden dabei identifiziert.

Der Betrachtungen der Prozess-FMEA richten sich auf die in der Wertschöpfungskette beteiligten Prozesse, was überwiegend auf die Produktionsprozesse abzielt. Unter zu Hilfenahme von Dokumenten aus der Produktion (Qualitätsdokumente, Reklamationen, Prozessfähigkeiten etc.) werden kritische Prozessschritte innerhalb der Kette

identifiziert, die möglicherweise zu einer erhöhten Ausfallwahrscheinlichkeit und somit Ausschuss oder Nacharbeit neigen. Durch die Verbindung zu fertigungsorientierten Prüfmerkmalen wird sichergestellt, dass Fehler in der Herstellungskette frühzeitig erkannt und entsprechend reagiert werden kann.

Bild 2.6 fasst den Ablauf der Merkmalspriorisierung mittels Produkt- und anschließender Prozess-FMEA zusammen.

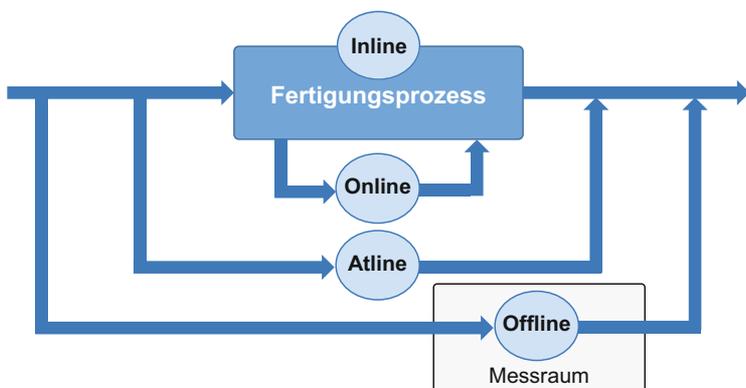
Die Einstufung eines Prüfmerkmals als „besonders“ nimmt eine wesentliche Bedeutung innerhalb der Prüfplanung ein, denn zahlreiche folgende Festlegungen werden dem folgend angepasst und der Aufwand dieser Prüfungen entsprechend intensiviert, da überwiegend erhöhte Prüfumfänge verlangt werden.

2.4.3 Fertigungsintegration, Prüfumfang, Prüfort und -mittel

Der nächste Schritt der Prüfplanung beinhaltet Festlegungen, welche untereinander in starken Wechselwirkungen stehen. Das äußert sich darin, dass Festlegungen gegenseitigen Einfluss aufeinander nehmen und dafür sorgen, dass Möglichkeiten eingeschränkt und Festlegungen vorgegeben werden.

Fertigungsintegration

Wesentlich ist es darin, festzulegen, welche Fertigungsprozessnähe die angestrebten Prüfungen aufweisen sollen. Es werden die wesentlichen Typen Inline-, Online-, Atline- sowie Offline-Prüfungen unterschieden, die sich sowohl im Grad der Prozessintegration/-nähe sowie, davon abhängig, im Prüfort unterscheiden. Bild 2.7 zeigt diese Unterscheidung. Die Festlegung gibt Hilfestellungen für die möglichen und notwendigen Prüfumfänge (zum Beispiel in Wechselwirkung mit angestrebten Taktzeiten), zu verwendende Prüfmittel sowie anzuwendende -prinzipien und -methoden.

**Bild 2.7**

Unterscheidung der Prozessnähe von Inline-, Online-, Atline- und Offline-Prüfungen

Inline-Prüfungen sind fester Bestandteil des Prozessablaufs und direkt in diesen integriert. Währenddessen muss das Prüfobjekt zur Prüfung nicht aus der Aufspannung in der Fertigungsmaschine herausgelöst werden. So werden echtzeitgenaue Monitorings von Messgrößen und somit Zuständen ermöglicht und der Prozessfluss weitgehend nicht durch die Messungen verzögert. Inline-Prüfungen eignen sich insofern besonders zur Prozessüberwachung und -regelung anhand der vorher definierten fertigungsprozessnahen Prüfmerkmale. Da dafür generell große Datensätze benötigt werden, ergeben sich hohe Prüfumfänge für Inline-Prüfungen.

Online-Prüfungen weisen auch eine hohe Prozessnähe auf, werden allerdings nicht während des Prozessablaufs durchgeführt. Online zu prüfen wird dann notwendig, wenn die zu prüfende Eigenschaft nicht inline prüfbar ist oder das einzusetzende Prüfmittel nicht für die erschwerten Bedingungen innerhalb der Fertigungsmaschine ausgelegt sind. Dennoch werden Online-Prüfungen nah an der zu betrachtenden Fertigungsmaschine durchgeführt, sodass die durch die Prüfung verursachte zeitliche Verzögerung minimal bleibt. Oft werden auch automatisierte Systeme unterstützend zur Bewegung und Positionierung des Prüfobjektes genutzt. In online Prüfungen werden überwiegend, analog zu Inline Prüfungen, hohe Prüfumfänge mit zumeist 100% Umfängen, gewählt.

Für Atline- und Offline-Prüfungen wird das Prüfobjekt der Prozesskette entzogen, wobei bei Atline-Prüfungen eine örtliche Nähe zur Prozesskette gewahrt und damit der zeitliche Vzug durch die Prüfungen eingegrenzt wird. Für Offline-Prüfungen wird das Prüfobjekt an einen anderen Ort transferiert. Das kann notwendig sein, wenn zur Prüfung erhöhte Anforderungen an die Umgebungen existieren und die Prüfungen nicht innerhalb der oft schwankungsbehafteten Fertigungsbedingungen durchführbar sind. Diese Schwankungen zeigen sich oft in Temperaturunterschieden, Vibrationen oder Verunreinigungen und lassen keine (hoch) genaue Messungen oder den Einsatz

sensibler Messgeräte zu. Somit werden einerseits deutlich komplexere und umfangreichere Prüfungen ermöglicht, jedoch die Möglichkeit zur schnellen Reaktion auf Fertigungsschwankungen wesentlich eingeschränkt.

Prüfumfang

Die Festlegung der Prüfumfänge hat eine hohe Bedeutung für die Prüfkosten. Das betrifft weniger Inline- und Online-Prüfungen, da in diesen die Fertigungsabläufe wenig verzögert werden und Prüfergebnisse direkt auf Fertigungscharakteristiken bezogen werden, sodass Analysen und Reaktionswege kurz sind.

Für Atline- und Offline-Prüfungen, welche für funktionsorientierte Prüfungen gewählt werden, wird die Weiterverarbeitung des Prüfobjektes verzögert. Außerdem sorgen komplexere Prüfmittel sowie gesondertes Prüfpersonal für weitere Kostenfaktoren. Deswegen werden bei funktionsorientierten Prüfungen, wenn nicht anders gefordert, vollumfängliche Prüfungen jedes Einzelstücks, gemieden. Vielmehr etablierten sich in der Vergangenheit Methoden zur Herleitung effizienter Stichprobengrößen in Abhängigkeit zum angestrebten Qualitätslevel und der Anzahl der akzeptierten, nicht gefundenen Fehler. Weiterführende Hilfestellungen sowie Übersichten mit Vorgaben sind in DIN ISO 3951-1 für Variablenprüfungen sowie in DIN ISO 2859-1 für Attributprüfungen einsehbar. Diese weisen auch Anpassungen der Stichprobengrößen auf Basis ansteigender Fehlerzahlen auf.

Prüfort und -mittel

Der Ort, das Personal sowie die notwendigen Prüf- und Prüfhilfsmittel (Vorrichtungen etc.) sind eng an die Definition des Prüfmerkmals und die avisierte Prozessnähe (siehe Bild 2.7) gekoppelt. Dabei schränkt die Prozessnähe den möglichen Prüfort und den notwendigen Personaleinsatz weitestgehend ein. Die möglichen Prüf-

Tabelle 2.1 Typen von Prüfungen und deren Einfluss auf andere Prüfplanfestlegungen

Kriterium	Inline	Online	Atline	Offline
Prozessnähe/Prüfort	höchste Fertigungsnähe, integriert in den Fertigungsablauf und -maschine	hohe Fertigungsnähe, oft in die Fertigungsmaschine integriert, aber nicht parallel ablaufend	geringe Fertigungsnähe, Entnahme des Prüfobjektes aus der Maschine notwendig	geringste Fertigungsnähe, räumliche Trennung zwischen Fertigung und Prüfung
Prüfmerkmale	fertigungsorientiert	fertigungsorientiert	funktionsorientiert	funktionsorientiert
Prüfumfang	zumeist 100%	zumeist 100%	aufgrund Effizienzanforderung mäßig hoch	aufgrund Effizienzanforderung gering
Erreichbare Komplexität der Prüfungen	gering, zumeist eindimensionale Prüfung einzelner Merkmale	gering, zumeist eindimensionale Prüfung einzelner Merkmale	durchschnittlich komplex, da weiterhin in der Fertigungsumgebung	hoch, da speziell ausgelegte Messräume und -umgebungen möglich

mittel werden zusätzlich wesentlich durch das Prüfmerkmal und die dafür festgelegten Toleranzen vorgegeben. Diese geben die maximal zulässige Unsicherheit des Messmittels vor. Die Gesamtmessunsicherheit sollte maximal 10% der vorgesehenen Toleranzgrenzen betragen. Aufgrund der damit sichergestellten Zuverlässigkeit der Prüfergebnisse nimmt die Planung der Feststellung sowie Überwachung der Prüfmittleignung eine wesentliche Bedeutung in Prüfplanungsprozessen ein.

Tabelle 2.1 vergleicht zusammenfassend Inline-, Online-, Atline- und Offline-Prüfungen anhand verschiedener Kriterien.

2.4.4 Prüfmittelüberwachung, -kalibrierung und -rückführung, Eignungsnachweis

Die Qualitätsmanagementnorm DIN EN ISO 9001 fordert einen Prozess zur Sicherstellung der Eignung eines Prüfmittels für die vorgesehene Prüfung sowie die stete Dokumentation derer Überwachung. Das Prüfmittelmanagement nimmt insofern eine wesentliche rechtliche Bedeutung ein, denn in Reklamationsfällen oder Streitigkeiten ist stets Sicherstellung der Prüfmittleignung in den durchgeführten Prüfungen nachzuweisen. Aber auch unternehmensintern bilden geeignete Prüfmittel und die daraus resultierenden zuverlässigen Prüfergebnisse eine wichtige Basis für Entscheidungen und Analysen.

Zur Feststellung und Beweisführung einer Prüfmittleignung existieren verschiedene Verfahren. Dazu zählen die Measurement System Analysis (MSA 2010), der VDA-Band 5 (Prüfprozesseignung, Eignung von Messsystemen, Mess- und Prüfprozessen bei geometrischen Merkmalen). Die Festlegung, ob und welches Verfahren angewendet wird, obliegt dem Unternehmen und dem Prüflplaner selbst, wobei zu beachten ist, dass die unterschiedlichen Verfahren branchenspezifisch sind und somit verschiedene Anforderungen und Eignungen derer Anwendung

bestehen. Zentrale Anforderung ist es, nachzuweisen, dass das gewählte Prüfmittel sowohl die notwendige zulässige Gesamtmessunsicherheit nicht überschreitet und weiterhin innerhalb von Fehlergrenzen vergleichbare und reproduzierbare Ergebnisse liefert.

Zur Etablierung einer auf der Prüfprozesseignung aufbauenden Prüfmittelüberwachung ist das Verständnis für die Kalibrierung, Justierung sowie Rückführung wichtig. *Kalibrieren* beschreibt den Vorgang des Abgleichs der ausgegebenen Prüfergebnisse mit deren bereits bekannten Ist-Werten. Kalibriert wird an Objekten, deren Ausprägung des relevanten Merkmals bekannt ist. Gemäß ISO 9001 muss die Rückführung direkt oder in mehreren Teilschritten auf ein nationales Normal gewahrt bleiben. Das wird sichergestellt, indem die jeweilige Kalibrierung anhand von Normalen durchgeführt werden, die durch Prüfmittel geringerer Unsicherheit bestätigt wurden. Daraus ergibt sich ein stufenweises Verfahren bis hin zur Rückführung auf durch nationale Institutionen bestätigte Normale. Durch das Fehlen derartiger Normale im Unternehmen kann auch ein externer Kalibrierdienstleister entsprechend mit der Kalibrierung von Prüfmitteln oder eigener Normale (Gebrauchsnormale) beauftragt werden. Weicht einer oder mehrere ausgegebene Werte während der Kalibrierung stärker vom Wert des kalibrierten Normals ab als es interne Vorgaben, Standards oder auch Herstellervorgaben zulassen, müssen entsprechende Maßnahmen ergriffen werden, da die Eignung des Prüfmittels in diesem Fall nicht mehr sichergestellt ist. Zuerst gilt es zu prüfen, inwiefern die vorher erzeugten Prüfergebnisse durch das nicht geeignete Prüfmittel beeinflusst wurden. Dafür sind die aktuell festgestellten Abweichungen in der Kalibrierung sowie der vorherigen Kalibrierung aufschlussreiche Indikatoren. Waren diese Abweichungen zuletzt auch verhältnismäßig hoch, sollten die zwischenzeitlichen Prüfungen wiederholt werden. Dafür kann auch in stichprobenartigen Wiederholprüfungen festgestellt werden, ob die Ergebnisse voneinander abweichen. Je

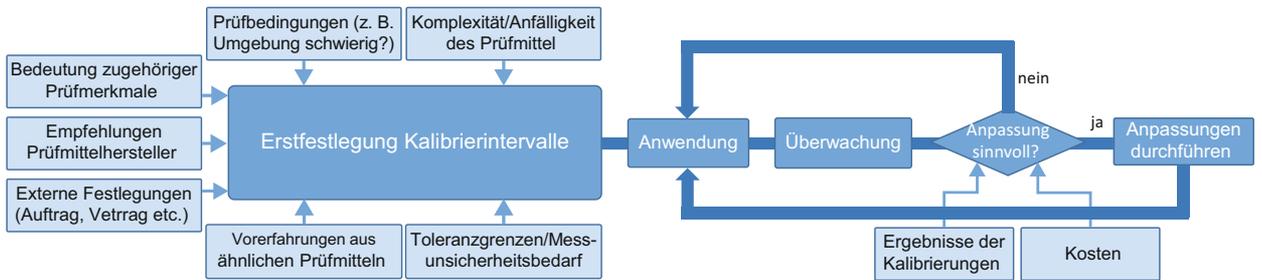


Bild 2.8 Erstfestlegung von Kalibrierintervallen sowie deren Anpassung

nach Bedeutung des mit dem Prüfmittel zu erfassenden Merkmals sind sogar Produktrückrufe möglich. Weiterhin sind Justierungen am Prüfmittel durchzuführen, um die Eignung für zukünftige Prüfungen wiederherzustellen. Justieren beschreibt den Prozess, aktiv in das Prüfmittel einzugreifen und Maßnahmen durchzuführen, um die Fehlergrenzen des Prüfmittels so weit zu reduzieren, bis dieses für die avisierte Prüfung geeignet sind.

Eine wesentliche Aufgabe ist die Planung der Kalibrierintervalle. Auch dazu existieren keine feste Vorgaben aus Normen, sodass es dem Prüfplaner überlassen wird festzulegen, wie oft oder in welchen zeitlichen Abständen ein Prüfmittel zu kalibrieren ist. Dabei sind einerseits Erstfestlegungen zu treffen, welche nach einer ausreichenden Anzahl an Kalibrierdurchgängen zu bewerten und gegebenenfalls zu verbessern sind, wie Bild 2.8 zeigt. Zur Erstfestlegung dient die Einbeziehung verschiedener Informationen, die sich aus der näheren Betrachtung der zukünftigen Prüfaufgaben orientieren (zum Beispiel Prüfbedingungen, Bedeutung der Prüfmerkmale, Toleranzgrenzen beziehungsweise das Verhältnis zwischen Messunsicherheit und Toleranzgrenzen) sowie sich aus übergeordneten Dokumenten (zum Beispiel Verträge, Empfehlungen des Prüfmittelherstellers) und aus Vorerfahrungen anderer Kalibrierungen ergeben können. Das wesentliche Kriterium für die Anpassung der Kalibrierintervalle ist die Anzahl der bestanden beziehungsweise nicht bestandenem Kalibriervorgänge sowie Kostenaspekte.

2.4.5 Dokumentation und Weiterverarbeitung der Daten

In diesem Schritt ist festzulegen, wie der Prüfplan selbst, vielmehr aber auch die damit verbundenen Daten abgelegt, dokumentiert und gegebenenfalls anderen Mitarbeitern zur Verfügung gestellt werden. Dazu zählt auch, in welchem Datenformaten ausgegeben wird und wer die Empfänger der erzeugten Daten (Ergebnisse der Kalibrierungen, Prüfergebnisse usw.) sind. Oftmals existieren

Systeme zur Unterstützung der Verwaltung dieser Daten, wie CAQ- oder datenbankbasierte Anwendungssoftware, welche Informationen und Daten für die Prüfplanung zur Verfügung stellen, für die durchzuführenden Prüfungen aufbereiten sowie die durch die Prüfungen erzeugten Daten aufnehmen.

2.4.6 Reaktionspläne, Prüfplanüberwachung, Freigabe

Es ist ebenso Bestandteil der Prüfplanung, entsprechende Reaktionspläne aufzustellen, sollten Prüfungen bestimmte Ereignisse, wie zum Beispiel das Übertreten von Toleranzgrenzen oder die Anzeige eines bestimmten Fertigungstrends, aufzeigen. Es ist vordergründig zu klären, welche Experten aus verschiedenen Bereichen (Qualität, Konstruktion, Fertigung, Verkauf etc.) darüber zu informieren sind, um die Prüfergebnisse gemeinsam zu sichten und entsprechend zu reagieren. Sollten wiederkehrende Ereignisse und wirksame Reaktionen darauf aus vorherigen Prüfreiheiten und Prüfplanungen bekannt sein, können diese dementsprechend in zukünftigen Prüfplänen berücksichtigt werden. Kurzfristige Maßnahmen könnten zum Beispiel die Intensivierung oder Verringerung der Stichprobenumfänge bei einer entsprechenden Anzahl von Fehlern oder die Einbeziehung eines weiteren Prüfmittels sein, um Ergebnisse abzusichern.

Ziel der Prüfplanüberwachung ist es, die Einhaltung und Wirksamkeit der Prüfplanfestlegungen sowie die verlustfreie Informationsweitergabe zu überwachen und, bei Abweichungen, entsprechend einzugreifen. Dabei ist es hilfreich eine Liste mit außerordentlichen Ereignissen zu erarbeiten, welche zum Stillstand und zur Überprüfung der erarbeiteten Festlegungen führen. Diese können zum Beispiel das Fehlen von Festlegungen oder Informationen oder die nicht Verarbeitbarkeit von Daten sein.

Sind alle prüfplanungsrelevanten Festlegungen getroffen, erfolgt die Freigabe durch den Freigabeverantwortlichen sowie die Ausgabe und Bereitstellung der für die jeweiligen Akteure notwendigen Dokumente. Gegebenenfalls

sind alle Festlegungen nochmals mit den Auftragsdokumenten abzugleichen oder mit dem Kunden abzusprechen, wenn diese Teile dessen Vertragsgegenstand sind.

2.5 Wirtschaftliche Relevanz der Prüfplanung

Die in der Prüfplanung getroffenen Festlegungen beeinflussen maßgeblich die Höhe der qualitätsbezogenen Kosten. Diese sind nach DIN 55350-11 definiert als die durch das Qualitätsmanagement entstehenden Fehlerverhütungs-, Prüf- und Fehlerkosten. Die direkt durch die Prüfplanung verursachten Kosten, wie Personalkosten der für diese Tätigkeit verantwortlichen Mitarbeiter, können den Fehlerverhütungskosten zugerechnet werden und nehmen zumeist einen verhältnismäßig kleinen Anteil ein. Bedeutsamer sind die Kosten, die durch die oben beschriebenen Festlegungen, wie Prüfhäufigkeit und Prüfort, direkt beeinflusst werden, die Prüfkosten. Dazu gehören all die Kosten, die durch die planmäßige Prüfung entstehen, wie z. B. die Prüfmittelkosten oder Personalkosten der an der Prüfung beteiligten Mitarbeiter. Darüber hinaus nimmt die Prüfplanung durch die getroffenen Festlegungen indirekten Einfluss auf die Fehlerkosten, die u. a. durch Ausschuss oder Nacharbeit aufgrund von festgestellten Fehlern zustande kommen. Je nach Ort der Fehlerfeststellung kann in interne (Fehlerentdeckung im Unternehmen) und externe Fehlerkosten (Fehlerentdeckung beim Kunden) unterschieden werden, wobei letztere auch schwer quantifizierbare, aber dennoch bedeutsame, Bestandteile wie Kosten durch Imageverlust enthalten können (DIN 55350-11).

Die drei Kostenarten sind nicht unabhängig voneinander zu betrachten. So nimmt durch den verstärkten Einsatz von präventiven Qualitätsmaßnahmen die Höhe der Fehlerverhütungskosten zwar zu, jedoch wird damit gleichzeitig eine Senkung der Fehlerkosten angestrebt. Ebenso ist der Zusammenhang zwischen Prüfkosten und Fehlerkosten nicht zu vernachlässigen. Werden Prüfkosten reduziert, kann dies zu einem zeitlich versetzten Anstieg von Fehlern und den damit verbundenen Kosten führen. Aufgrund dieser Zusammenhänge ist es nicht zielführend, die Kostenarten nur getrennt voneinander zu betrachten, sondern immer auch im Verhältnis zueinander (Jochem 2019).

Die Prüfplanung wirkt vor allem auf die Prüf- und die Fehlerkosten ein und nimmt dadurch Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Produkten und Prozessen. Insbesondere

der Einfluss der hier getroffenen Festlegungen zu Prüfzeitpunkt und Stichprobengröße soll für diese besonders kostenrelevanten Entscheidungen beispielhaft näher erläutert werden. Der Prüfzeitpunkt ist entscheidend für die Höhe der Fehlerkosten. Diese nehmen tendenziell immer stärker zu, je später die Prüfung durchgeführt und der potenzielle Fehler entdeckt wird, da die Beseitigung eines Fehlers mit zunehmender Wertschöpfungsstufe mit immer höheren Kosten verbunden ist (sog. Zehnerregel). Außerdem ermöglicht eine frühe Identifikation von Fehlern eine leichtere Ermittlung der Fehlerursachen als bei einer Fehlerentdeckung am Ende des Fertigungsprozesses. Eine Prüfung, die im Produktlebenszyklus also möglichst früh durchgeführt wird, kann somit eine Reduzierung der Fehlerkosten bewirken, indem beispielsweise fehlerhafte Teile nicht weiterverarbeitet, sondern direkt nachgearbeitet oder als Ausschuss entsorgt werden (Benes und Groh 2017). Die Stichprobengröße bestimmt gemeinsam mit anderen Festlegungen unmittelbar die Höhe der Prüfkosten. Je größer der Prüfumfang, desto höher sind die mit der Prüfung verbundenen Kosten und umgekehrt. Eine Reduzierung der Stichprobengröße zur Kostensenkung ist aber nicht unbedingt zielführend, da gleichzeitig der oben angesprochene Zusammenhang zwischen eingesparten Prüfungen und dem damit verbundenen Anstieg der Fehlerkosten zu beachten ist.

Grundsätzlich sind neben den Zusammenhängen der Kostenarten außerdem die getroffenen Festlegungen der Prüfplanung zu berücksichtigen, aus denen sich Einschränkungen für andere Festlegungen ergeben können, wie die Fertigungsnähe oder die Definition des Prüfmerkmals. Für die kostenorientierte Festlegung der Prüfmerkmale ist eine Abwägung der Kosten, die durch die Prüfung des jeweiligen Merkmals entstehen, gegenüber den Kosten, die durch die frühzeitige Entdeckung des Fehlers eingespart werden können, notwendig. Dafür ist Kenntnis über die potenziellen Fehler sowie deren Relevanz und deren Auftretenswahrscheinlichkeit erforderlich. Zudem ist zu bestimmen, inwiefern der Fehler mittels des zu prüfenden Merkmals identifizierbar ist (Entdeckenswahrscheinlichkeit). Je größer diese drei Kriterien ausgeprägt sind, desto größer ist tendenziell der Nutzen einer Prüfung anhand des Prüfmerkmals. Diesem Nutzen sind die durch die Prüfungen verursachten Kosten gegenüber zu stellen. Dieser Vergleich zwischen Kosten und Nutzen von Prüfungen bedarf eines strukturierten Vorgehens, das sowohl die Festlegungen der Prüfplanung als auch Informationen aus einer qualitätskostenbezogenen Kostenrechnung einbezieht. Eine Möglichkeit einer solchen Methodik stellt die Verknüpfung einer FMEA mit entsprechenden Kostenanalysen dar (Haffner 2005).

Insgesamt zeigt sich die hohe Relevanz der Prüfplanung für die Wirtschaftlichkeit der Produkte und Prozesse und

die damit verbundene Notwendigkeit der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Prüfplanung als Reaktion auf die stetigen Veränderungen des industriellen Umfelds.

I

2.6 Trends und Perspektiven der Prüfplanung

Die Anforderungen an die Prüfplanung sowie deren wirtschaftliche Bedeutung im industriellen Umfeld verändern sich wesentlich durch die zunehmende Verbreitung datenbasierender Produktionssysteme. Diese verändern die Prüfplanung in mehreren Aspekten:

- Vertiefung neuer Ziele von Prüfungen (zum Beispiel zur Prozesslenkung)
- zunehmende wirtschaftliche Bedeutung, da erheblich mehr Entscheidungen und Korrekturen aufgrund von Daten abgeleitet werden
- höchste Ansprüche an Datenqualität, Datenzuverlässigkeit sowie Datenverfügbarkeit
- kurze Entwicklungs- und Vorserienphasen verringern die zur Verfügung stehende Zeit zur Durchführung und Optimierung der Prüfplanung
- stetig verringerte Toleranzen, Variantenvielfalt sowie komplexere Designs, Bauweisen und Fertigungsprozesse erschweren Festlegungen von Prüfplanungsinhalten
- die zunehmende Integration in die Prozessketten bedarf einer wesentlichen Dynamisierung und Adaption der Prüfungen und Prüfplanung
- neue Trends der Produktionssysteme erfordern die Anpassungs- und Wandlungsfähigkeit der Prüfungen und Prüfplanung
- die rasante Entwicklung in der Prüf- bzw. Messgerätehardware erschweren Investitionsentscheidungen sowie deren zielführenden Einsatz
- die in aktuellen Qualitätsmanagementsystemen zu gewährleistende Rückführung von Messsystemen sowie die Feststellung und Einbeziehung der Messunsicherheit erhöhen generell den Umfang und Komplexität der Prüfplanung

Die Tendenz zur Dynamisierung vormals starrer Prozesse wirkt sich somit auf die Prüfplanung aus, wobei die verschiedenen gezeigten Teilprozesse der Prüfplanung unterschiedliche Möglichkeiten zur Dynamisierung und Adaption besitzen. So weist zum Beispiel die Prüfmerkmalsdefinition geringe Potenziale zur Dynamisierung auf, die sich zudem nur auf fertigungsnahe Prüfungen beziehen. Dahingegen ist die Festlegung von Prüfhäufigkeiten

Ziel von echtzeitnahen und situationsbedingten Anpassungen, was weitreichende Verbesserungen hinsichtlich der Effizienz von Prüfungen bietet.

2.7 Danksagung

Das IGF-Vorhaben (Nr.20888 BR) der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Qualität e.V. (FQS), August-Schanz-Straße 21 A, 60433 Frankfurt am Main wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

- DIN 55350-II: Begriffe zum Qualitätsmanagement - Teil 11: Ergänzung zu DIN EN ISO 9000:2005*, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag, Berlin, 2008
- DIN 1319-1: Grundlagen der Messtechnik - Teil 1: Grundbegriffe*, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag, Berlin, 1995
- DIN ISO 3951-1: Verfahren für die Stichprobenprüfung anhand quantitativer Merkmale (Variablenprüfung) - Teil 1: Spezifikation für Einfach-Stichprobenanweisungen für losweise Prüfung, geordnet nach der annehmbaren Qualitätsgrenzlage (AQL) für ein einfaches Qualitätsmerkmal und einfache AQL*, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag, Berlin, 2016
- DIN ISO 2859-1: Annahmestichprobenprüfung anhand der Anzahl fehlerhafter Einheiten oder Fehler (Attributprüfung) - Teil 1: Nach der annehmbaren Qualitätsgrenzlage (AQL) geordnete Stichprobenpläne für die Prüfung einer Serie von Losen*, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag, Berlin, 2016
- DIN EN ISO 9001: Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen*, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag, Berlin, 2015
- MSA: Measurement System Analysis, Automotive Industry Action Group (AIAG)*, 4. Aufl., 2010
- VDA-FMEA: AIAG & VDA FMEA-Handbuch*, VDA QMC, 2019
- VDA-Band 5: Mess- und Prüfprozesse*, VDA QMC, 2021
- IATF 16949: Qualitätsmanagementsysteme - Besondere Anforderungen bei Anwendung von ISO 9001:2008 für die Serien- und Ersatzteil-Produktion in der Automobilindustrie*, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag, Berlin, 2009
- Benes, G., Groh, P.E.: Grundlagen des Qualitätsmanagements*, 4. Aufl., München, 2017
- Jochem, R.: Was kostet Qualität? Wirtschaftlichkeit von Qualität ermitteln*, München, 2. Aufl., 2019
- Haffner, A.: Ein Modell zur Bestimmung der monetären Einsparungspotenziale bei der Durchführung einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)*, Dissertation, 2005

3 Adaptive Prüfplanung

Meike Huber, Jonathan Greipel

3.1	Einführung in die adaptive Prüfplanung	25
3.2	Aufgaben der adaptiven Prüfplanung	26
3.2.1	Umsetzung der Adaptivität durch übergreifende Prozessströme	26
3.2.2	Umsetzung der Adaptivität innerhalb der Prozesssschritte	27
3.2.2.1	Adaption von Prüfmerkmalen	27
3.2.2.2	Adaption des Prüfumfangs	29
3.2.2.3	Adaption der Prüffrequenz	29
3.2.2.4	Festlegung der Prüfmittelüberwachung, Kalibrierung und Rückführung	31
3.2.2.5	Festlegung der Prüfdatenerfassung und -auswertung	31
3.2.2.6	Adaption weiterer in der Prüfplanung berücksichtigter Schritte	34
3.3	Zusammenfassung und Ausblick	34
3.4	Danksagung	35

3.1 Einführung in die adaptive Prüfplanung

Steigende Kundenansprüche hinsichtlich individueller Produkte sowie an die Qualitätssicherung, die Nachverfolgbarkeit sowie die Datennutzung im Kontext der Industrie 4.0 führen dazu, dass initial erstellte Prüfpläne nicht länger über den gesamten Produktlebenszyklus genutzt werden können.

Gemäß Schmitt et al. können verschiedene Auslöser in Kraft treten, welche eine Anpassung des Prüfplans erforderlich machen [SCHM16]:

- proaktiv-interne Auslöser, die innerhalb eines Unternehmens erwünscht sind, z. B. durch Kostensenkungen oder kontinuierliche Prozessverbesserung etc.
- reaktiv-interne Auslöser, die von innen gesteuert werden und z. B. durch eine neue Risikobewertung oder Anpassungen des Produkts etc. notwendig sind
- reaktiv-externe Auslöser, die von außen getrieben werden und z. B. aufgrund einer Kundenbeanstandung oder neuer Normen und Gesetze etc. notwendig sind

Diese Auslöser führen dazu, dass ein initial erstellter Prüfplan innerhalb eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses angepasst werden muss. Daraus ergibt sich ein Wechsel von der statischen Prüfplanung, bei der einmalig ein Prüfplan entwickelt wird, der für die Lebensdauer des Herstellungsprozesses gilt, zu einer adaptiven Prüfplanung, welche auf oben beschriebene Auslöser reagiert. Bei der adaptiven Prüfplanung werden die Prüfergebnisse und die sich ständig ändernde Produktionsumgebung kontinuierlich analysiert und die Analyseergebnisse in die Prüfplanung zurückgeführt, um Prüfpläne bei Bedarf

kosten-, zeit- und risikooptimal anzupassen. Bei der Analyse werden dabei sowohl interne Einflüsse, beispielsweise durch Vorgaben der Produktion oder Entwicklung, als auch externe Einflüsse, wie Kundenanforderungen, berücksichtigt (Bild 3.1) [SCHM16].

Die adaptive Prüfplanung wird vorwiegend produktionsbegleitend angewandt, da hier, beispielsweise im Gegensatz zu der Prüfplanung in der Produktentwicklung, auf Erfahrungswerte und bereits aufgenommene Prüfdaten zurückgegriffen werden kann. Zur Analyse der erfassten Daten können unterschiedliche statistische Methoden genutzt werden. Problematisch hierbei ist jedoch, dass die durchzuführenden Analysen häufig komplex und damit in der Praxis aufgrund von fehlender Zeit und mangelndem Fachwissen kaum umgesetzt werden können. Ein Ansatz zur Lösung dieses Problems, der im Kontext von Industrie 4.0 verfolgt wird, ist der Einsatz von Production Process Mining [FOID15]. Production Process Mining dient dazu, automatisiert prozessorientiertes Wissen aus in Informationssystemen gesammelten Produktionsdaten zu generieren. Dies reduziert den Personaleinsatz bei zeitintensiven Analysen, befähigt die Unternehmen jedoch trotzdem dazu, optimale Prüfintervalle, fertigungskritische Prüfmerkmale etc. für ihre Prüfprozesse zu identifizieren. Das generierte, datenbasierte objektive Wissen wird hierbei automatisiert in einer für den Menschen interpretierbaren Form dargestellt [SON14]. Der Implementierungsaufwand für Production Process Mining in Unternehmen ist derzeit noch hoch und daher hauptsächlich ein Thema der Forschung und Entwicklung.

In den folgenden Abschnitten werden die Aufgaben der adaptiven Prüfplanung beschrieben und von den Aufgaben der klassischen Prüfplanung abgegrenzt. Es wird insbesondere darauf eingegangen, inwiefern Prüfmerkmale, Prüfmfänge und die Prüffrequenz auf Basis der Prüfdä-

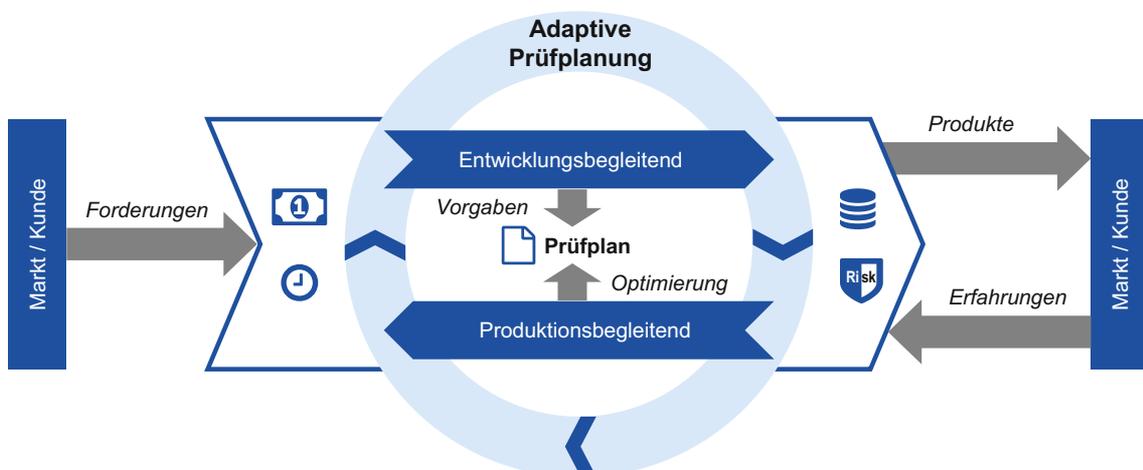


Bild 3.1 Konzept der adaptiven Prüfplanung (angelehnt an [SCHM16])

ten vergangener Prüfungen adaptiert werden können. Weiter wird beschrieben, welche Infrastruktur für die adaptive Prüfplanung benötigt wird und mithilfe welcher Analysemethoden Prüfdaten systematisch ausgewertet werden können. Zuletzt wird im Ausblick beschrieben, welche Herausforderungen aktuell im Kontext der adaptiven Prüfplanung bestehen und wie diese zukünftig bewältigt werden können.

3.2 Aufgaben der adaptiven Prüfplanung

Das übergeordnete Ziel der adaptiven Prüfplanung ist es, fortlaufend sicherzustellen, dass die Prüfprozesse hinsichtlich der eingesetzten Ressourcen und der geforderten Qualität optimiert sind. Dafür wird die gesamte Prüfplanung adaptiv gestaltet und ständig validiert, d. h., dass die Prüfergebnisse hinsichtlich der relevanten Randbedingungen (Stückzahlen, Produktanforderungen etc.) kontinuierlich analysiert und die Schritte im Prüfprozess bei Bedarf angepasst werden. Bei prozessschrittunabhängigen Änderungen der Randbedingungen wird der Prüfplan im Nachgang vollständig geprüft und gegebenenfalls angepasst. Bei Änderungen der Randbedingungen innerhalb von Prozessschritten sind jeweils der Prozessschritt sowie alle mit dem Prozessschritt im Zusammenhang stehenden Schritte zu prüfen und anzupassen [MUEL19].

Zur Umsetzung der adaptiven Prüfplanung wird der allgemeine Prozess der Prüfplanung (vgl. Teil I, Kapitel 2, „Prüfplanung“) um übergreifende Prozessströme ergänzt.

Die Prozessströme sorgen für eine übergreifende Verknüpfung der einzelnen Prozessschritte und sind Voraussetzung für die adaptive Gestaltung des Prüfplans. In Bild 3.2 ist das um die Prozessströme erweiterte Verfahren der adaptiven Prüfplanung dargestellt.

In den folgenden Abschnitten werden die übergreifenden Prozessströme und Prozessschritte ausführlich erläutert und beschrieben, wie eine adaptive Gestaltung des Prüfplans damit ermöglicht wird.

3.2.1 Umsetzung der Adaptivität durch übergreifende Prozessströme

Die Integration übergreifender Prozessströme ist Voraussetzung für die Einführung einer adaptiven Prüfplanung. Die Prozessströme beschreiben Maßnahmen, die in jedem Prozessschritt zu beachten sind. Die beschriebenen Maßnahmen gelten außerdem während der Nutzung eines erstellten Prüfplans und definieren beispielsweise, wann der Prüfplan den gegebenen bzw. neuen Randbedingungen anzupassen ist. Die Ziele und Wege zur Umsetzung der vier in Bild 3.2 dargestellten Prozessströme werden nachfolgend beschrieben [MUEL19].

IT-Infrastruktur

Ziel dieses Prozessstroms ist die Umsetzung eines optimalen IT-Gesamtkonzepts für das Unternehmen, um die Datenaufnahme und -analyse, auch beispielsweise im Sinne der Industrie 4.0, zu ermöglichen. Für jeden Schritt innerhalb der Prüfplanung wird analysiert und ermittelt, welche Softwaresysteme, Datenbanken und Schnittstellen für eine Umsetzung der adaptiven Prüfplanung nötig sind. Aufgrund der Bedeutung für die Prüfplanung werden die



Bild 3.2 Verfahren zur adaptiven Prüfplanung (vgl. [MUEL19])

IT-Komponenten in dem Schritt „Festlegung der Prüfdatenerfassung und -auswertung“ nochmals hinterfragt und zu einem Gesamtkonzept fusioniert. Zudem wird neben der Vernetzung der einzelnen Systeme die Vernetzung zu übergeordneten Systemen inkl. der notwendigen Schnittstellen festgelegt [MUEL19].

Planung der Mitarbeiterschulung

Ziel ist es, ein ganzheitliches Schulungskonzept für die Prüfer zu entwickeln. Hierfür wird für jeden Schritt dokumentiert, welche Schulungen relevant sind. Anhand dessen wird das Schulungskonzept entwickelt, das z. B. die Nutzung der Messsysteme, die Nutzung der Softwarelösungen, und allgemeine Regeln zur Gewährleistung einer validen Prüfung beinhaltet. Die Schulungen qualifizieren Prüfer dafür, die Prüfung durchzuführen. Schulungen müssen auch nach der Adaption eines bestehenden Prüfplans durchgeführt werden [MUEL19].

Dokumentation des Vorgehens

Ziel ist die fortlaufende Dokumentation aller während der Prüfplanerstellung oder -änderung getroffenen Entscheidungen und deren Hintergründe. Dies ist nötig, um den Anforderungen der DIN EN ISO 9001 gerecht zu werden, eine adaptive Prüfplanung und deren Effizienz sowie eine Argumentation zu getroffenen Entscheidungen gegenüber Kunden zu gewährleisten [DIN15]. Entscheidungen sind so zu dokumentieren, dass eine Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist und evaluiert werden kann, ob eine Anpassung eines bestehenden Prüfplans bei der Änderung einer Randbedingung notwendig ist. Mit der fortlaufenden Dokumentation wird außerdem sichergestellt, dass rechtzeitig auf Veränderungen im Prüfprozess reagiert werden kann. Die fortlaufende Dokumentation bezieht sich auf alle im Prüfprozess definierten Schritte. Wird in einem der Schritte oder in der Datenauswertung eine Auffälligkeit (z. B. Überschreiten von Warngrenzen) erkannt, ist eine Adaption des Prüfplans notwendig. Hierfür muss ein Reaktions- und Maßnahmenplan entwickelt werden, in dem definiert ist, wie mit entsprechenden Auffälligkeiten umgegangen wird und welche Maßnahmen hinsichtlich einer Adaption des Prüfplans zu ergreifen sind. Der Reaktions- und Maßnahmenplan kann Auswirkungen auf alle Schritte des Prüfplans haben. Nach einer Adaption des Prüfplans ist eine erneute Validierung der Schritte bzw. des Prüfplans notwendig [MUEL19].

Neben den Auslösern, welche durch eine Änderung der Randbedingungen eine Überprüfung des Prüfplans veranlassen, muss eine regelmäßige Prüfung des Prüfplans vorgesehen werden. Die regelmäßige Prüfung sieht vor, dass

jeder der Schritte zur Prüfplanung durch einen Experten geprüft und validiert wird. Sollten sich Randbedingungen geändert haben oder aus anderen Gründen eine Anpassung notwendig sein, so ist der Prozess der Prüfplanung erneut vollständig zu durchlaufen. Alle Änderungen sind zu begründen und zu dokumentieren.

Analyse der Randbedingungen

Ziel ist es, stetig einen optimalen Prüfplan zur Verfügung zu stellen. Dafür wird die gesamte Prüfplanung adaptiv gestaltet, d. h., dass eine ständige Analyse sich ändernder Randbedingungen (Stückzahlen, Produkthanforderungen etc.) nötig ist. Dies hat Auswirkungen auf die Neuerstellung eines Prüfplans sowie auf bestehende Prüfpläne. Da bei der Neuerstellung aufgrund von Planungsunsicherheiten nicht immer zu Beginn der Prüfplanung alle Randbedingungen festgesetzt werden können, werden die Randbedingungen zu Beginn jedes Prozessschritts erneut analysiert und dokumentiert. Eine ständige Analyse der Randbedingungen ermöglicht auch die Adaption bereits bestehender Prüfpläne. Bei prozessschrittunabhängigen Änderungen der Randbedingungen ist der Prüfplan vollständig zu prüfen und gegebenenfalls anzupassen. Bei Änderungen der Randbedingungen in Prozessschritten sind jeweils der Prozessschritt sowie alle mit dem Prozessschritt im Zusammenhang stehenden Schritte zu prüfen und gegebenenfalls zu adaptieren [MUEL19].

3.2.2 Umsetzung der Adaptivität innerhalb der Prozessschritte

Im Folgenden wird für die einzelnen Schritte aus Bild 3.2 detailliert beschrieben, welche Auslöser zu einer Adaption der Schritte innerhalb der Prüfplanung führen, wie die Adaption durchgeführt wird und welche Konsequenzen eine Adaption des Schrittes für den restlichen Prüfplan hat. Da nicht alle Schritte der „klassischen“ Prüfplanung adaptiv gestaltet werden können, wird der Fokus auf die Schritte gelegt, bei denen die adaptive Prüfplanung die meiste Anwendung findet.

3.2.2.1 Adaption von Prüfmerkmalen

Bei der Adaption der Prüfmerkmale werden zuvor definierte Prüfmerkmale aus dem Prüfplan entfernt oder zusätzliche Merkmale zur Prüfung hinzugezogen. Die Adaption von Prüfmerkmalen wird erforderlich, wenn auf Basis der erhobenen Daten ermittelt wurde, dass durch eine Verringerung der Prüfmerkmale die Kosten bei gleichbleibendem Prüfrisiko oder das Risiko durch eine Hinzu-

nahme weiterer Prüfmerkmale bei vertretbaren Kosten gesenkt werden können.

Ein wichtiges Verfahren zur Reduzierung von Prüfmerkmalen ist die Identifikation von Schlüsselmerkmalen. Gemäß Lee und Thornton sind Schlüsselmerkmale diejenigen Merkmale, welche sich signifikant auf die Kosten, die Leistung oder die Sicherheit eines Produkts auswirken, sollte die Ausprägung des Merkmals vom Sollwert abweichen [LEE96]. Die adaptive produktionsbegleitende Identifikation von Schlüsselmerkmalen ist auf die Absicherung des Fertigungsprozesses ausgelegt. Die von der Produktentwicklung z. B. über FMEA bestimmten Schlüsselmerkmale werden als Basis für die Schlüsselmerkmalsbestimmung zur Fertigungsabsicherung genutzt. Mithilfe von Statistical Process Control (SPC) und den darin enthaltenen Fähigkeitsanalysen anhand historischer Daten lässt sich die fertigungsbedingte Kritikalität von Prüfmerkmalen ableiten. So ist bewertbar, ob die mit den entwicklungsbegleitenden Methoden identifizierten Prüfmerkmale auch fertigungskritisch sind. Falls nicht, sind diese für Prüfungen obsolet und es ist eine weitere Reduktion des Prüfaufwands realisierbar [SCHM16].

Neben den Verfahren aus der SPC haben auch Algorithmen aus dem Bereich des Machine Learning das Potenzial, für die Identifikation von Schlüsselmerkmalen genutzt zu werden. Die Identifikation der Schlüsselmerkmale erfolgt dann in zwei Schritten: In einem ersten Schritt werden Merkmale, welche redundante Informationen über die Bauteilqualität liefern, gruppiert. Im Anschluss werden aus den gruppierten Merkmalen die relevanten Merkmale, d. h. diejenigen, welche hinsichtlich der Toleranz am kritischsten sind, als Schlüsselmerkmale definiert. Die Algorithmen basieren auf unsupervised Feature-Selection-Methoden, die im Machine Learning dazu dienen, redundante und relevante Merkmale in Datensätzen zu identifizieren. Zur Identifikation von Redundanz zwischen den einzelnen Merkmalen können folgende Ansätze genutzt werden:

- **Principal Feature Analysis:** Transformation korrelierter Variablen über Eigenvektoren und Eigenwerte in einen kleineren Satz unkorrelierter Variablen, clustering der Eigenvektoren wird mit K-means zur Gruppierung der Merkmale [LU07]
- **Sparse Principal Component Analysis:** Erzeugung einer dünn besetzten (engl. „sparse“) Hauptkomponentenmatrix zur Interpretation von Merkmalsabhängigkeiten; Gruppierung aller Merkmale, die zu einer Hauptkomponente gehören und größer null sind [ZOU06]
- **Clusteranalyse:** Ermittlung einer Ähnlichkeitsmatrix unter Verwendung von Distanzmaßen, z. B. euklidische Distanz/Korrelation zwischen Merkmalen, und Gruppierung auf Basis der Ähnlichkeitsmatrix [WIED10]

- **Autoencoder:** spezielles neuronales Netz zur Datenkomprimierung; Gruppierung über die Gewichtsmatrix des neuronalen Netzes [SONG13]

Um relevante Merkmale zu identifizieren, wurden supervised Feature-Selection-Methoden gewählt. Bei supervised Learning-Methoden (vgl. Abschnitt 3.2.2.5) werden Daten genutzt, die über ein sog. Label identifiziert sind. Im Bereich der Prüfplanung kann ein solches Label beispielsweise das Prüfergebnis in Form eines quantitativen Messwerts oder einer OK/NOK-Angabe sein. Es können beispielsweise die folgenden Entscheidungskriterien zur Identifikation von Schlüsselmerkmalen genutzt werden:

- **Informationsgehalt:** Mit dem Informationsgehalt wird die Beziehung der Merkmale zum Label hergestellt. Je nach Größe des Informationsgehalts und eines vorgegebenen Grenzwerts werden die Schlüsselmerkmale der Gruppe definiert [NUNE96].
- **Prozessfähigkeit:** Für jedes Merkmal wird die Fähigkeit bestimmt und die Merkmale werden als Schlüsselmerkmale ausgewählt, die einen bestimmten Fähigkeitskennwert nicht erfüllen, z. B. $cpk < 1,33$ [SCHM16].
- **RELIEFF-Algorithmus:** Der RELIEFF-Algorithmus berechnet für jedes Merkmal ein Gewicht auf der Grundlage seines Labels. Die Gewichtung ist eine Schätzung der Relevanz des Merkmals [ROBN03].
- **Risiko:** Alle Merkmale einer Gruppe werden einmal als einzig zu prüfendes Merkmal der Gruppe angenommen. Es wird für jedes Merkmal errechnet, wie oft dessen Verwendung zur richtigen Klassifizierung aller Merkmale führt, und ein Risiko abgeleitet. Merkmale mit kleinem Risiko werden Schlüsselmerkmale.

Die Algorithmen zur Ermittlung von Redundanzen und Relevanz der Merkmale werden kombiniert. Zur Bewertung der besten Algorithmenkombination können verschiedene Kennzahlen, wie die „Accuracy“ (Anteil der richtigerweise als intakt oder fehlerhaft deklarierten Merkmale bei allen Prüfungen), „Specificity“ (Anteil der als fehlerhaft deklarierten Merkmale in Bezug auf die tatsächlich fehlerhaften Merkmale), „Sensitivity“ (Anteil der als intakt deklarierten Merkmale in Bezug auf die tatsächlich intakten Merkmale) eingesetzt werden.

Da in der adaptiven Prüfplanung stets historische Daten und Daten aus den unmittelbar vorhergehenden Prüfungen herangezogen werden, werden alle möglichen Prüfmerkmale betrachtet. Somit ist bei Anwendung der oben beschriebenen Algorithmen sichergestellt, dass sowohl eine Erweiterung der Prüfung um weitere relevante Merkmale als auch eine Reduzierung der Prüfmerkmale möglich ist.

3.2.2.2 Adaption des Prüfumfangs

Neben der Adaption der Anzahl der zu prüfenden Merkmale kann auch die Wahl des Prüfumfangs adaptiv gestaltet werden. Ähnlich wie bei der Festlegung der Prüfmerkmale erfolgt die adaptive Bestimmung des Prüfumfangs auf Basis zuvor aufgenommener Prüfdaten. Das Ziel der adaptiven Bestimmung des Prüfumfangs ist es, die Effizienz der Prüfung mittels statistischer Probeannahmetechniken zu steigern. Hierbei wird entschieden, ob ein zuvor definierter Prüfumfang, z.B. eine 100%-Prüfung oder ein fixer Stichprobenumfang, in Abhängigkeit von sich verändernden Rahmenbedingungen angepasst werden kann. Adaptive Probenannahmetechniken werden oftmals in Kombination mit SPC oder Data-Analytics-Methoden eingesetzt. Der Hauptvorteil der Anpassungsfähigkeit liegt in der zweifachen Optimierung der Wirtschaftlichkeit: Einerseits wird das Risiko eines instabilen Prozesses und von Fehlern reduziert, indem die Stichprobenumfänge effizient gestaltet werden. Andererseits wird die Sampling-Effizienz gesteigert, die es ermöglicht, so wenig Teile wie möglich zu prüfen, solange der Prozess stabil ist. Gemäß Nduhura-Munga et al. spricht man auch von einer adaptiven Stichprobentechnik, wobei die 100%-Prüfung hier einen Sonderfall einnimmt [NDUH13]. Zur adaptiven Definition der Stichprobenumfänge existieren verschiedene Normen und Richtlinien sowie Verfahren aus der Mathematik und Statistik. Die gängigen Richtlinienreihen DIN ISO 2859 für attributive Prüfmerkmale [DIN14, DIN21, DIN07] und DIN ISO 3951 für variable Merkmale [DIN16] liefern nicht nur ein Verfahren zur initialen (statischen) Festlegung der Prüfumfänge, sondern liefern ebenfalls einen Leitfaden zu einer ersten Adaption der Stichprobenumfänge, basierend auf vorherigen Prüfergebnissen. Weiter beschreiben beispielsweise Meisen et al. ein Verfahren zur Ermittlung von Stichprobenumfängen und kritischen Werten zur Annahme einer Stichprobe, basierend auf den aus historischen Daten geschätzten Verteilungsparametern [MEIS12]. Alle Verfahren haben gemeinsam, dass für ihre Anwendung eine gewisse Datenbasis aus vorherigen Prüfungen vorhanden sein muss.

Die adaptive Stichprobentechnik grenzt sich von der statischen oder Start-Stichprobentechnik, bei der die Prüfumfänge fix gewählt werden, und der dynamischen Stichprobentechnik, bei der die Stichprobenumfänge in Echtzeit gewählt werden, ab. Letztere erfordert jedoch einen hohen Einsatz an Sensorik und Möglichkeiten zur Echtzeit-Datenauswertung, sodass die Implementierung mit einem hohen Aufwand verbunden ist [NDUH13].

Voraussetzung für die Stichprobenprüfung ist ein ausreichend großer Losumfang. In einigen Fällen ist jedoch der

Losumfang nicht groß genug, um eine Stichprobenentnahme zu realisieren und damit den Prüfaufwand zu verringern. Ein klassisches Beispiel für kleine Losumfänge ist die Variantenproduktion: Hierbei werden viele verschiedene Varianten gefertigt, die oftmals nur in kleinen Losgrößen vorliegen [ELMA12]. Um dennoch eine Stichprobenprüfung zu ermöglichen, können Mischlose definiert werden. Ziel der Mischlosdefinition ist die Zusammenfassung von verschiedenen Varianten zu möglichst homogenen Varianten-Gruppen, deren Losgröße deutlich größer ist als die der einzelnen Varianten. Diese Gruppierung zu Mischlosen dient dazu, durch die Vergrößerung der Losgröße eine Stichprobenprüfung zu ermöglichen [GREI17a]. Zur Mischlosdefinition können drei unterschiedliche Ansätze genutzt werden:

- Pooling von Daten: Bilden paarweiser Kombinationen von Varianten, Bestimmung der Ähnlichkeit über paarw. Vergleich von Mittelwerten und Varianzen, Gruppierung der Varianten [WU15]
- Agglomerative Clusteranalyse: Quantifizierung der Ähnlichkeit der Varianten anhand der übereinstimmenden Merkmale und geometrischen Daten mittels statistischer Distanzmetriken [MURT12]
- Expectation Maximization: Festlegung einer Clusteranzahl, Fit einer Normalverteilung mit zufälligen Verteilungsparametern für jedes Cluster, Anpassung der Verteilungsparameter anhand der Daten innerhalb des Clusters, Zusammenfassen mehrerer Cluster, Wiederholung der vorherigen Schritte, bis sich die Verteilungen/Verteilungsparameter nicht mehr ändern [MOON96]

Zur Bewertung und Identifikation des besten Algorithmus zur Mischlosbildung wird die Inhomogenität der Mischlose betrachtet: Je mehr Varianten zu einem Mischlos gruppiert werden, umso höher ist das Risiko, inhomogene Mischlose zu bilden. Zur Quantifizierung dieses Risikos kann das Bayessche Informationskriterium genutzt werden [NEAT12].

3.2.2.3 Adaption der Prüffrequenz

Die Prüffrequenz legt fest, in welchen Intervallen die Entnahme einer Stichprobe erfolgt bzw. wann geprüft wird [KART14]. Die Abgrenzung zwischen der Prüffrequenz und dem Prüfumfang ist in Bild 3.3 dargestellt: Während bei einer Reduktion des Prüfumfangs die Anzahl der geprüften Teile reduziert wird, wird bei einer Reduktion der Prüffrequenz die Anzahl der zur Prüfung in Betracht gezogenen Lose verringert.

Eine Verringerung der Prüffrequenz ist nur dann möglich, wenn Wissen in Form von Daten oder Erfahrungen über

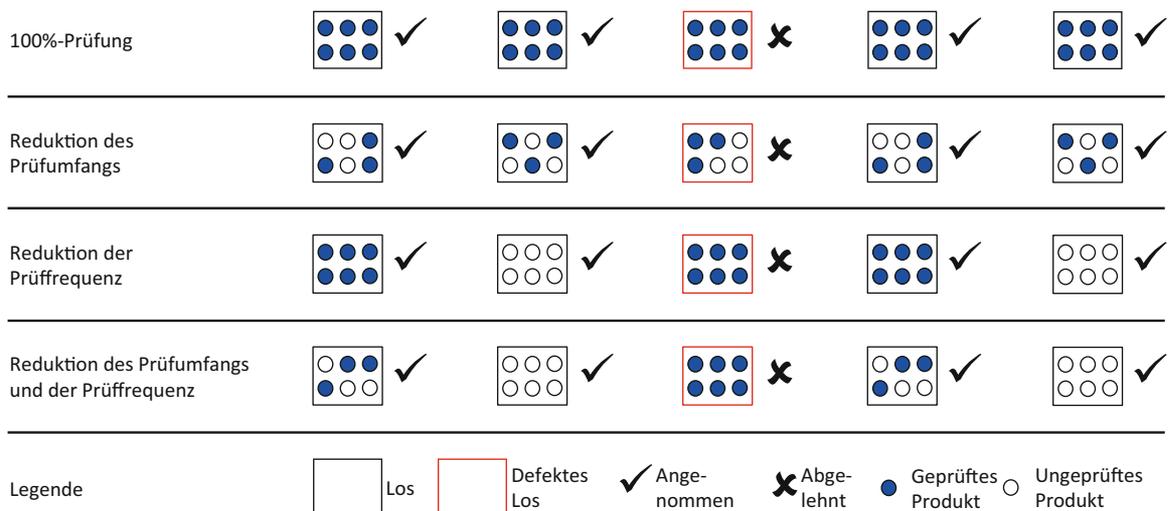


Bild 3.3 Darstellung von Prüfungen mit verschiedenen Prüffrequenzen und Prüfumfängen

den Prüfprozess vorliegt und hinsichtlich des Risikos für Fehlentscheidungen analysiert wurde. Da dieses Wissen in der statischen oder klassischen Prüfplanung in der Regel nicht berücksichtigt wird, ist die Anpassung der Prüffrequenz Aufgabe der adaptiven Prüfplanung. Ähnlich wie bei der Wahl des Stichprobenumfangs ist das Ziel, das mit der Anpassung der Prüffrequenz verfolgt wird, die Sicherstellung statistisch begründeter Entscheidungen auf Basis des Prüfprozesses unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit. Auch bei der Wahl der Prüffrequenz zeichnet sich ein Zielkonflikt ab: Bei der Wahl einer hohen Prüffrequenz ist das Risiko, systematische und zufällige Abweichungen nicht zu detektieren, gering. Sowohl der finanzielle als auch der organisatorische Aufwand steigt jedoch mit der Erhöhung der Prüffrequenz an. Um eine optimale Prüffrequenz in Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit und das (statistische) Risiko zu wählen, muss die Prüffrequenz daher so hoch wie nötig, aber auch so niedrig wie möglich sein. Zur Festlegung einer optimalen Prüffrequenz wird zwischen drei verschiedenen Ansätzen unterschieden: der losbezogenen, der eventbezogenen und der zeitbezogenen Prüffrequenzwahl. Im Folgenden werden die Verfahren zur Wahl der Prüffrequenz beschrieben.

Losbezogene Prüffrequenzwahl

Bei der losbezogenen Prüffrequenzwahl wird ein im Vorfeld festgelegter Anteil der Lose geprüft. Der Anteil der zu prüfenden Lose wird im Falle der adaptiven Prüfplanung auf Basis von Daten aus vorangegangenen Prüfungen mittels statistischer Methoden ermittelt. Innerhalb eines zuvor definierten Zeithorizonts bleibt der Anteil der zu prüfenden Lose konstant und ist unabhängig von weiteren äußeren Einflüssen oder der Zeit [BERG07].

Eventbezogene Prüffrequenzwahl

Die eventbezogene Wahl der Prüffrequenz stammt aus der dynamischen Stichprobentechnik. Hierbei werden zumeist weitere Informationen aus dem Produktionsprozess bezüglich einer Charge hinzugezogen. Diese werden gemäß einer Regel bewertet. Zum Beispiel werden Prozessparameter bei der Herstellung eines Produkts aufgenommen und beobachtet. Wenn diese bestimmte Grenzwerte überschreiten, muss das entsprechende Produkt geprüft werden. Die Regeln und Grenzwerte werden derzeit zumeist durch Expertenwissen definiert. Um diese zu objektivieren, werden derzeit Methoden des Data Minings, Machine Learnings und der Statistik genutzt, um Korrelationen zwischen Prozessparametern und den Produktmerkmalen herzuleiten [BERG07].

Zeitbezogene Prüffrequenzwahl nach dem Nyquist-Shannon-Theorem

Das Nyquist-Shannon-Theorem ist ein grundlegendes Theorem der Informationstheorie. Es besagt, dass man ein deterministisches Signal aus einer Folge aus äquidistanten Abtastwerten rekonstruieren kann, sofern gilt, dass

$$f_{\text{Abtast}} \geq 2 \times f_{\text{max}}$$

wobei f_{Abtast} die Abtastfrequenz und f_{max} die im Prozess schnellstmögliche Frequenz ist. Man spricht bei f_{Abtast} auch von der Nyquist-Rate. Eine etablierte Methode zur Identifizierung der Prüffrequenzwahl liegt nun in der Adaption des Nyquist-Shannon-Theorems auf die Prüfplanung. Durch die kontinuierliche Überwachung eines Prozesses erfährt man den exakten Verlauf der Streuung

des Prozesses (Abweichungen). Leider ist es nicht wirtschaftlich, jeden Prozess kontinuierlich zu überwachen. Eine diskrete Abtastung eines Prozesses sollte jedoch nur dann akzeptiert werden, wenn die diskrete Annäherung an den realen Prozess mit der genutzten Abtastfrequenz hinreichend genau ist. Dies ist gegeben, wenn das Nyquist-Shannon-Theorem erfüllt wird. Das Verfahren modelliert die Überwachung eines Prozesses als Abtastung eines stochastischen Prozesses. Insbesondere ermöglicht das Nyquist-Shannon-Theorem die Bestimmung von Untergrenzen sowohl für die Abtastrate als auch für die Stichprobengröße. Die untere Grenze der Abtastrate ist die Nyquist-Rate selbst, während die untere Grenze der Stichprobengröße das Produkt der Nyquist-Rate multipliziert mit der Abtastzeit ist [BERG07, POR19]. Das Verfahren zur Ermittlung der Prüffrequenz im Kontext der Prüfplanung sei an dem folgenden Beispiel erklärt: Aus den vorliegenden Daten ist bekannt, dass in einem Produktionsprozess maximal in einem Los pro Tag fehlerhafte Bauteile vorliegen, d.h., es gilt $f_{max} = 1/d$. Somit ergibt sich eine Abtastrate von $f_{Abtast} \geq 2/d$, d.h., es müssen mindestens zwei Lose pro Tag geprüft werden.

Zeitbezogene Prüffrequenzwahl Average Run Length (ARL)

Im Allgemeinen erleichtern größere Stichproben das Erkennen kleinerer Abweichungen des Prozesses. Die Wahl großer Stichprobenumfänge ist jedoch oft nicht wirtschaftlich. Eine Möglichkeit, dieses Problem zu lösen, besteht darin, den Aufwand zur Entnahme von Stichproben über einen gewissen Zeitraum zu „verteilen“: Entweder nimmt man kleine Stichprobenumfänge in kurzen Abständen oder größere Umfänge in längeren Abständen. Montgomery stellt einen Ansatz basierend auf der durchschnittlichen Lauflänge (engl. Average Run Length, kurz: ARL) vor. Die Lauflänge ist definiert als die durchschnittliche Anzahl der Stichproben, die auf eine Regelkarte aufgetragen werden müssen, bis eine Stichprobe außerhalb der Eingriffs- bzw. Warn Grenzen liegt. Wenn die Prozessbeobachtungen nicht korreliert sind, kann die ARL für jedes Shewhart-Kontrolldiagramm verwendet und leicht berechnet werden. Es gilt:

$$ARL = 1/p$$

Hierbei ist p die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Wertes außerhalb der Eingriffs- bzw. Warn Grenzen, welche auf Basis vorheriger Prüfungen bestimmt wird [MONT13]. Die ARL gibt an, in welcher Prüffrequenz eine Stichprobe mit dem gemäß Abschnitt 3.2.2.2 berechneten Umfang entnommen werden muss.

3.2.2.4 Festlegung der Prüfmittelüberwachung, Kalibrierung und Rückführung

Ziel der Prüfmittelüberwachung nach DIN 32937 ist es, sicherzustellen, dass ein Prüfmittel die Anforderungen erfüllt, die für seine beabsichtigte Verwendung gelten [DIN18]. Ein dazu notwendiges und dokumentiertes System für die Bestätigung und für den Einsatz von Prüfmitteln muss daher berücksichtigen, dass alle Prüfmittel wie beabsichtigt funktionieren [DIN18]. Bei der Prüfmittelüberwachung wird sowohl die Kurzzeit- als auch die Langzeitstabilität berücksichtigt. Trotzdem kann es aufgrund ungewollter Beschädigungen bzw. neu hinzugekommener Einflussfaktoren, die bei dem Eignungsnachweis noch nicht bekannt waren, zu Veränderungen des Messprozesses kommen, sodass dieser „nicht mehr geeignet“ ist. Um eine signifikante Veränderung der Messprozesse rechtzeitig erkennen zu können, wird der Prüfprozess gemäß VDA 5 z. B. mittels einer Regelkarte überwacht [VDA21]. Das Überwachen der Prüfmittel kann sowohl intern in der Organisation als auch extern durch Dienstleistungsunternehmen durchgeführt werden.

Durch den vermehrten Einsatz von Sensorik und der Vernetzung der Systeme und Daten kommen zudem auch immer öfter datengetriebene Methoden zur Prüfmittelüberwachung und Einsteuerung der Kalibrierung zum Einsatz. In dem Kontext der adaptiven Prüfplanung finden daher vermehrt Methoden aus dem Bereich Predictive Maintenance (deutsch: vorausschauende Instandhaltung) ihre Anwendung. Das Ziel von Predictive Maintenance ist es, basierend auf Prozess-, Produktions- und Prüfdaten zu prognostizieren, wann Wartungen und Kalibrierungen notwendig sind, und somit Ausfallzeiten zu reduzieren. So können Instandhaltungsmaßnahmen frühzeitig geplant und unerwartete Ausfälle im bestmöglichen Fall vermieden werden [ZHAN19]. Im Kontext der Prüfmittelüberwachung bedeutet dies, dass aufgenommene Daten dazu genutzt werden, automatisiert eine Prognose zu erstellen, wann eine Kalibrierung oder ein Austausch des Prüfmittels notwendig ist [MUEL20]. Eine ausführliche Analyse der gängigen Methoden zur datenbasierten Bestimmung der Kalibrierintervalle findet sich unter anderem in [ERNS21]. Durch die entstehende Planungssicherheit wird eine optimale Verfügbarkeit fähiger Prüfmittel gewährleistet.

3.2.2.5 Festlegung der Prüfdatenerfassung und -auswertung

Für eine adaptive Prüfplanung und die damit implizierten kontinuierlichen Verbesserungen ist die Aufnahme von Prüfdaten, eine Datenanalyse und die Rückführung der Daten grundlegend. Bei der Festlegung der Datenerfas-

sung muss darauf geachtet werden, dass alle notwendigen Prüfdaten aufgenommen werden, jedoch nicht unnötig viele Informationen, die vielleicht keinen Mehrwert liefern, gespeichert werden. Über die Datenanalyse werden wichtige Informationen über das Produkt, die Produktion und die Prüfung gesammelt. Diese sind nötig, um existierende Prüfpläne anzupassen [MUEL19].

Prüfdatenerfassung

Zur Umsetzung einer adaptiven Prüfplanung ist eine kontinuierliche Aufnahme und Analyse sowie Korrelation von Produkt- und Prozessdaten nötig. Ziel der Festlegung der Datenerfassung ist es daher zu definieren, welche Daten in welcher Form aufgenommen werden müssen, um die Umsetzung einer adaptiven Prüfplanung zu ermöglichen [MUEL19].

Wie in der „klassischen“ Prüfplanung ist auch in der adaptiven Prüfplanung der Einsatz von Datenbanken und von CAQ-Systemen sinnvoll, um eine erste Datenbasis zu schaffen und entsprechende Auswertungen gezielt durchführen zu können [PFEI21]. Während in der „klassischen“ Prüfplanung jedoch die Prozesse einzeln analysiert werden und Daten einzelner Prüfungen und Schritte der Prüfplanung isoliert betrachtet werden, muss für die Umsetzung der adaptiven Prüfplanung eine Verknüpfung der einzelnen Prozesse und Schritte gewährleistet sein. Die Umsetzung einer solchen Verknüpfung von Systemen, Datenbanken und Analysetools ist in Bild 3.4 dargestellt. Aus Bild 3.4 wird ersichtlich, dass nicht nur die Prüfdaten re-

levant für eine umfassende Analyse sind, sondern beispielsweise auch zugehörige Stammdaten oder organisatorische Daten zur Zuordnung. Weiter ist zur Umsetzung der Adaptivität eine direkte Verknüpfung zu den Prüfplänen notwendig, um diese ggf. anzupassen und z. B. zu detektieren, ob ein eventueller Fehler in einer vorgelagerten Prüfung nicht entdeckt wurde. Nicht nur die Verknüpfung der Daten innerhalb einer Prüfung, sondern über den gesamten Produktentstehungsprozess ist daher relevant.

Die aufgenommenen Daten werden innerhalb einer Qualitätsanalyse ausgewertet (s. Abschnitt „Prüfdatenauswertung – datengestützte Analyse der Prüfergebnisse“). Durch die komplexe Datenstruktur ist daher neben gängiger CAQ-Software ein vermehrter Einsatz von Data-Analytics-Software nötig.

Prüfdatenauswertung – datengestützte Analyse der Prüfergebnisse

Die Prüfplanung legt die Basis für ein intelligentes datengetriebenes Qualitätsmanagement, das durch die Integration einer automatisierten Datenanalyse zur Produktinspektion und zu prozessbezogenen Messdaten erreicht wird. Früher war das Ziel der Produktprüfung, die Qualität eines Merkmals oder eines Produkts sicherzustellen [MUEL19]. Heute sollen Daten nicht nur verwendet werden, um eine Entscheidung in Bezug auf die Produktqualität zu treffen, sondern um automatisch Informationen und Entscheidungen zur Verbesserung der Produktion

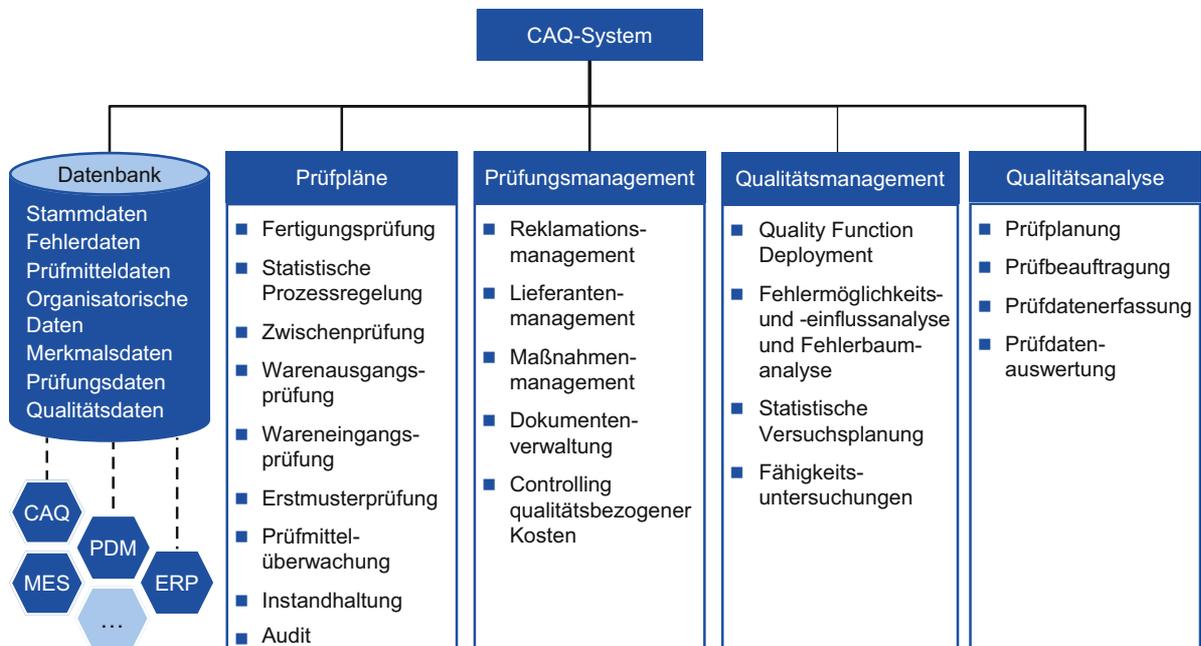


Bild 3.4 Aufgaben und Schnittstellen eines CAQ-Systems

oder zur Reduzierung der Inspektionskosten abzuleiten. Dabei werden Prozessdaten mithilfe einer automatisierten Datenanalyse mit Produktprüfdaten korreliert. Die Datenanalyse bezieht sich auf den Prozess der Anwendung statistischer Methoden, maschinellen Lernens usw., um Informationen aus Daten zu extrahieren. Die abgeleiteten Informationen werden dann für Schlussfolgerungen und zur Entscheidungsunterstützung verwendet [KOTS07, RUSS16]. Methoden zur Datenanalyse werden in vier verschiedene Klassen eingeteilt, die im Folgenden sortiert nach steigendem Mehrwert und steigenden Anwendungskosten aufgeführt sind:

- **Descriptive Analytics** beantwortet die Frage, was passiert ist. Es enthält eine Beschreibung der interessierenden Phänomene, Beziehungen und der Bedingungen, unter denen sie auftreten [GREG06].
- **Diagnostic Analytics** gibt Auskunft darüber, wie, warum und wann etwas passiert ist. Die Erklärung bietet ein besseres Verständnis für die interessierenden Phänomene [GREG06].
- **Predictive Analytics** gibt an, was voraussichtlich passieren wird. Es verwendet die Ergebnisse deskriptiver und diagnostischer Analysen zur Vorhersage. Sie gibt mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit an, was in Zukunft passieren wird, wenn bestimmte Bedingungen zutreffen [GREG06].
- **Prescriptive Analytics** legt fest, welche Maßnahmen zur Erreichung eines bestimmten Ziels zu ergreifen sind. Dies wird durch die Berücksichtigung der Vorhersagen verschiedener Szenarien erreicht und unterstützt oder automatisiert daher die Entscheidungsfindung [GREG06].

Die am häufigsten angewandten Qualitätsmanagementmethoden wie SPC oder FMEA basieren auf deskriptiven und diagnostischen Analysen. Damit im Kontext des Internet of Production (kurz: IoP) eine automatisierte Entscheidungsunterstützung ermöglicht werden kann, muss jedoch eine prädiktive und präskriptive Analyse integriert werden. Daher stehen derzeit Methoden der prädiktiven und präskriptiven Datenanalyse im Fokus der Forschung, z. B. in den Bereichen Data Science und Methoden des Machine Learning. Methoden des Machine Learning versprechen schnelle und zuverlässige Ergebnisse im Bereich der Modellierung und Vorhersage von Ergebnissen trotz häufig unstrukturierter und komplexer Daten. Sie bieten die Möglichkeit, Daten ohne Expertenwissen automatisch auszuwerten [KAGE16]. Machine-Learning-Methoden können je nach Art der Überwachung in vier Kategorien eingeteilt werden:

- **Supervised learning:** Um überwachte Lernmethoden zu trainieren, werden Datensätze mit Tags/Labels (z. B. Klassifizierung in OK und NOK) den Machine-Learning-

Methoden zugeführt. Durch die Verknüpfung des Tags mit anderen im Datensatz enthaltenen Variablen wird ein Vorhersagemodell generiert [GERO17].

- **Unsupervised learning:** Unbeaufsichtigte Lernmethoden werden angewendet, um unbeschriftete Datensätze zu trainieren. Ziel ist es, von den Erkenntnissen zu profitieren, die durch die unterschiedliche Zusammenfassung von Daten gewonnen werden. Es wird verwendet, um Muster zu erkennen, ohne dass Kenntnisse über den Datensatz vorhanden sind [GERO17].
- **Semisupervised learning:** Teilüberwachte Lernalgorithmen verarbeiten Datensätze, die teilweise beschriftete und nicht beschriftete Daten enthalten. Die meisten halbüberwachten Lernalgorithmen sind Kombinationen aus unbeaufsichtigten und überwachten Algorithmen [GERO17].
- **Reinforcement Learning:** Für das Reinforcement Learning werden keine beschrifteten Datensätze, sondern ein definiertes Ziel benötigt. Der Lernalgorithmus beobachtet die Umgebung, wählt Aktionen aus und führt sie aus. Er erhält Belohnungen, je näher er dem Ziel kommt. Das Ziel des Algorithmus ist es, die beste Strategie zu identifizieren, um den größten Nutzen zu erhalten [GERO17].

Um Machine-Learning-Methoden im Qualitätsmanagement und im IoP anzuwenden, müssen verschiedene Herausforderungen bewältigt und erforscht werden:

- **Machine-Learning-Algorithmen** benötigen große Datenmengen für das Training, um optimale Vorhersageergebnisse zu erzielen. Dies widerspricht dem Trend zu immer individuelleren Produkten und der daraus resultierenden Kleinserienfertigung, die nur kleine Stichprobengrößen liefert. Daher ist es eine große Herausforderung, Methoden zur Erhöhung der Stichprobengröße für das Training der Algorithmen zu erforschen. Entweder geschieht dies durch statistische Methoden wie Bootstrapping und Datensynthese oder durch Identifikation ähnlicher Produktfamilien, deren Prozess- und Messdaten zusammengeführt werden können [GUBB13; GREI17b].
- Die meisten Sensoren liefern Zeitreihendaten (z. B. Schnittgeschwindigkeit über die Zeit), aber Machine-Learning-Methoden arbeiten meist mit Datenpunkten. Daher ist das Extrahieren von Indizes aus Zeitreihendaten von großer Notwendigkeit. Derzeit werden zwei Methoden zum Extrahieren von Indizes untersucht. Zunächst werden die Zeitreihendaten wie bei einer FEM-Simulation auf ein physikbasiertes Modell angewendet und daraus ein Index abgeleitet, beispielsweise die maximale Kraft. Zweitens werden gemeinsame statistische Indizes wie der Maximalwert der Zeitreihendaten verwendet [PILL16].

- Die Einbeziehung von Expertenwissen zur Verbesserung der Vorhersageergebnisse ist wichtig. In Unternehmen ist oft viel Prozesswissen vorhanden. Es müssen einfache Methoden und Datenvorverarbeitungsstandards entwickelt werden, um das vorhandene Wissen in Machine-Learning-Methoden einzubeziehen. Erste Ergebnisse belegen eine Verbesserung der Prognoseleistung [PILL16].
- Die Verwendung von Machine-Learning-Algorithmen und deren Vorhersagen zur Unterstützung oder Automatisierung der Entscheidungsfindung birgt ein Risiko. Methoden zur Bewertung und zum Umgang mit dem Risiko der Verwendung von Machine-Learning-Algorithmen in Inspektionsprozessen müssen erforscht werden. Zum Beispiel, wenn ein vorhergesagter Messwert eines Merkmals anstelle eines gemessenen Werts verwendet wird.
- Die Automatisierung von Machine-Learning-Methoden durch die Erstellung nützlicher Algorithmen ist für eine realistische Anwendung in Unternehmen – insbesondere in KMU – unerlässlich. Erstens ist das Wissen über diese Methoden in Produktionsunternehmen häufig nicht verfügbar, und zweitens führt die Vorverarbeitung von Daten zu hohen Kosten. Daher ist es notwendig, die Datenvorverarbeitung zu standardisieren und Machine-Learning-Algorithmen an gängige Produktionsszenarien anzupassen.

3.2.2.6 Adaption weiterer in der Prüfplanung berücksichtigter Schritte

Im Folgenden werden einige, bislang nicht berücksichtigte Schritte aus der klassischen Prüfplanung aufgegriffen, bei denen eine Adaption möglich ist.

Prüfart

Die Adaption der Prüfart kann erforderlich sein, wenn sich die geforderte Genauigkeit der Prüfergebnisse ändert. Wird beispielsweise auf Basis der Analyseergebnisse festgestellt, dass ein bestimmtes Merkmal repräsentativ für die Qualität einer Gruppe von Merkmalen oder des ganzen Bauteils ist und dieses als Schlüsselmerkmal festgelegt werden soll, kann es sein, dass anstelle einer attributiven Prüfung eine variable Prüfung notwendig wird. Umgekehrt kann es der Fall sein, dass bei Merkmalen, deren Relevanz für die Gesamtbewertung des Bauteils gering ist, anstelle einer variablen Prüfung eine schneller durchzuführende attributive Prüfung genutzt werden kann.

Prüfzeitpunkt

Der Prüfzeitpunkt selbst wird zu Beginn der initialen, klassischen Prüfplanung festgelegt. Betrachtet man die Prüfprozesse isoliert, ist eine Adaption des Prüfzeitpunkts nicht unbedingt möglich. Anders verhält es sich, wenn die Gesamtheit der Prüfprozesse umfassend analysiert wird. Insbesondere bei Zwischenprüfungen besteht die Möglichkeit der Adaption. Mit zunehmendem historischen Datensatz und dessen Analyse kann evaluiert werden, ob Zwischenprüfungen gemäß getroffenen Annahmen während der Erstplanung der Prüfprozesse richtig sind bzw. ob sich über die Zeit durch den kontinuierlichen Verbesserungsprozess Potenziale ergeben haben, die es erlauben, Zwischenprüfungen abzuschaffen. Auch hier sind Fähigkeitsanalysen hilfreich.

Prüfpersonal und Prüfort im Fertigungsprozess

Wie der Prüfzeitpunkt sind auch die Festlegung von Prüfpersonal und Prüfort eher Aufgaben der statischen bzw. klassischen Prüfplanung. Fällt jedoch während der umfassenden Analyse eines Prüfprozesses auf, dass die Prüfergebnisse durch eine Veränderung von Prüfpersonal oder -ort verbessert werden können, ist eine Integration dieser beiden Aspekte in die adaptive Prüfplanung möglich.

Eine Adaption des Prüfpersonals kann beispielsweise dann notwendig sein, wenn auf Basis längerer Untersuchungen festgestellt wird, dass das Prüfpersonal nicht ausreichend qualifiziert ist und sich Fehler daher häufen. Umkehrt kann es der Fall sein, dass Prüfungen durch überqualifiziertes Personal durchgeführt werden, und eine Kostensenkung bzw. nutzensteigernde Kostenumverteilung durch den Einsatz anderer Fachkräfte erreicht werden kann. Der Prüfort kann adaptiert werden, wenn hierdurch Prozesse flexibler, beschleunigt oder präziser werden. Diese Erkenntnis ergibt sich aus einer umfassenden Analyse der Produktions- und Prüfprozesse.

3.3 Zusammenfassung und Ausblick

Die adaptive Prüfplanung stellt eine Möglichkeit dar, vorhandene (historische) Prüfdaten zu analysieren und zur kosten-, zeit- und risikoverringenden Anpassung der Prüfpläne zu nutzen. Das Verfahren setzt voraus, dass eine gewisse Datenbasis und Erfahrungswissen vorhan-

den sind, greift jedoch nicht auf in Echtzeit generierte Prozessdaten zurück. Einen Lösungsansatz zur Echtzeit-Nutzung der Prozessdaten bietet der eingangs beschriebene Einsatz von Production Process Mining. Mithilfe dieses Ansatzes sollen datenbasierte objektive Entscheidungen getroffen und dem Anwender in interpretierbarer Form bereitgestellt werden. Aufgrund eines hohen Implementierungsaufwands findet dieser Ansatz derzeit in der Praxis noch kaum Anwendung und ist eher im Bereich der Forschung und Entwicklung angesiedelt.

Durch die immer weiter steigende Dichte und Vernetzung von Informationen und Daten im Zuge von Big Data und Industrie 4.0 stellt der Ansatz des Production Process Mining in Zukunft eine Alternative zur derzeit angewandten adaptiven Prüfplanung dar. Sind Echtzeit-Informationen kontinuierlich verfügbar, so kann eine automatisierte Datenauswertung bis hin zur dynamischen Prüfplanung realisiert werden. Die dynamische Prüfplanung hat den Vorteil, dass nicht nur vorhandene, historische Daten genutzt werden, sondern auch auf spontane Änderungen reagiert werden kann. Sind ausreichend Datenquellen vorhanden, kann zudem der Einsatz von Erfahrungswissen reduziert werden, da die Informationen aus den Daten heraus generiert werden können.

Die Weiterentwicklung der Prüfplanung von einer adaptiven hin zu einer dynamischen Lösung ist damit derzeit durch den hohen Aufwand in der Implementierung durch die Bereitstellung der Daten-Infrastruktur begrenzt. Im Zuge von Big Data und Industrie 4.0 sind jedoch dynamische Lösungen bis hin zu einer vollautomatisierten Prüfplanung denkbar.

3.4 Danksagung

Die Forschungsarbeiten, die zu den vorgestellten Ergebnissen geführt haben, sind in dem IGF-Vorhaben Nr. 20618 N/11 „App-basierte Aufwandsreduzierung bei der adaptiven Prüfung in der Produktion von Varianten“ (kurz: APProVe) entstanden. Das IGF-Vorhaben Nr. 20618 N der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Qualität e. V. (FQS), August-Schanz-Straße 21 A, 60433 Frankfurt am Main wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Der Schlussbericht des Projektes ist auf Anfrage bei der FQS Forschungsgemeinschaft Qualität e. V. erhältlich.

Literatur

- [BERG07] Berger, K.; Bar-Gera, H.; Kalir, A.; Rabinowitz, G.: Analytical Model for Optimal Inspection Frequency with Consideration of Setup Inspections. In: 2007 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (pp. 1081 - 1086). IEEE, September 2007
- [DIN07] DIN ISO 2859-3:2007 - Annahmestichprobenprüfung anhand der Anzahl fehlerhafter Einheiten oder Fehler (Attributprüfung) - Teil 3: Skip-Lot-Verfahren (ISO 2859-3:2005)
- [DIN14] DIN ISO 2859-1:2014 - Annahmestichprobenprüfung anhand der Anzahl fehlerhafter Einheiten oder Fehler (Attributprüfung) - Teil 1: Nach der annehmbaren Qualitätsgrenzlage (AQL) geordnete Stichprobenpläne für die Prüfung einer Serie von Losen
- [DIN15] DIN EN ISO 9001:2015 - Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen
- [DIN16] DIN ISO 3951-1:2016 - Verfahren für die Stichprobenprüfung anhand quantitativer Merkmale (Variablenprüfung) - Teil 1: Spezifikation für Einfach-Stichprobenanweisungen für losweise Prüfung, geordnet nach der annehmbaren Qualitätsgrenzlage (AQL) für ein einfaches Qualitätsmerkmal und einfache AQL (ISO 3951-1:2013)
- [DIN18] Norm DIN 32937 (04/2018): Mess- und Prüfmittelüberwachung - Planen, Verwalten und Einsetzen von Mess- und Prüfmitteln
- [DIN21] DIN ISO 2859-2:2021 - Annahmestichprobenprüfung anhand der Anzahl fehlerhafter Einheiten oder Fehler (Attributprüfung) - Teil 2: Nach der rückzuweisenden Qualitätsgrenzlage (LQ) geordnete Stichprobenanweisungen für die Prüfung einzelner Lose (ISO 2859-2:2020)
- [ELMA12] EUMaraghy, H. A. (Hrsg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. Proceedings of the 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual production (CARV2011), Montreal, Canada, 2-5 October 2011, Springer, Berlin, Heidelberg 2012
- [ERNS21] Ernst, R.: Festlegung von Prüffristen in der Praxis. In: VDI-Berichte (2390), S. 329 - 340, 2021
- [FOID15] Foidl, H.; Felderer, M.: Research challenges of industry 4.0 for quality management. In: International Conference on Enterprise Resource Planning Systems, S.121 - 137, 2015
- [GERO17] Geron, A: Hands-on machine learning with Scikit-Learn and TensorFlow. Concepts, tools, and techniques to build intelligent systems. 2nd release, Beijing 2017
- [GREG06] Gregor, S: The Nature of Theory in Information Systems. In: MIS Quarterly, Vol. 30, No.3, pp. 611 - 642, 2006
- [GREI17a] Greipel, J.; Ortiz Sarceño, D.; Schmitt, R. H.: Adaptive Prüfplanung für Kleinserien. Automatisierbare Methodik zur Erstellung eines adaptiven Stichproben-Prüfplans für Kleinserien. In: wt-online, S.780 - 785, 2017
- [GREI17b] Greipel, J.; Li, Y.; Schmitt, R. H.: Concept for Clustering of Similar Quality Features for Optimization of Processes in Low Volume Manufacturing. In: Schmitt, R. H.; Schuh, G. (Hrsg.): 7. WGP-Jahreskongress Aachen, 5. - 6. Oktober 2017, Apprimus Wissenschaftsverlag, S.363 - 371, Aachen 2017
- [GUBB13] Gubbi, J.; Buyya, R.; Marusic, S.; Palaniswami, M.: Internet of Things (IoT) - A vision, architectural elements, and future directions. In: Future Generation Computer Systems 29(7), 2013

- [KAGE16] Kagermann, H.; Anderl, R.; Gausemeier, J.; Schuh, G.; Wahlster, W.: Industrie 4.0 in a Global Context. acatech STUDY, 2016
- [KART14] Kartha, C. P.: On determining the optimal sampling frequency for feedback quality control systems. *Analele Științifice ale Universității Alexandru Ioan Cuza «din Iași, Științe economice*, 61(1), S. 55 – 66, 2014
- [KOTS07] Kotsiantis, S. B.: Supervised Machine Learning: A Review of Classification Techniques. *Informatica*, Vol. 31, pp. 249 – 268, 2007
- [LEE96] Lee, D. J.; Thornton, A. C.: The Identification and Use of Key Characteristics in Product Development Process. In: Volume 4: 8th International Conference on Design Theory and Methodology. American Society of Mechanical Engineers, 1996
- [LU07] Lu, Y.; Cohen, I.; Zhou, X. S.; Tian, Q.: Feature selection using principal feature analysis. In: Proceedings of the 15th international conference on Multimedia – MULTIMEDIA, 07. S. 301, ACM Press, New York, New York, USA 2007
- [MEIS12] Meisen, S.; Pepelyshev, A.; Steland, A.: Quality assessment in the presence of additional data in photovoltaics. *Frontiers in Statistical Quality Control 10*. S. 251 – 274, Physica, Heidelberg 2012
- [MONT13] Montgomery, D. C.: Introduction to statistical quality control. 7th ed., Wiley, Hoboken 2013
- [MOON96] Moon, T. K.: The expectation-maximization algorithm. *IEEE Signal processing magazine*, 13(6), S. 47 – 60, 1996
- [MUEL19] Müller, T.; Greipel, J. S.; Schmitt, R. H.: Adaptive Prüfplanung. Die neue Richtlinie VDI/VDE 2600-3 als Leitfaden für die Industrie. In: VDI-Berichte (2365), S. 257 – 270, 2019
- [MUEL20] Müller, M. F.: Condition Monitoring of Test Equipment Using Autoencoders. 2020
- [MURT12] Murtagh, F.; Contreras, P.: Algorithms for hierarchical clustering: an overview. *WIRES Data Mining Knowl Discov* 2, 1, S. 86 – 97, 2012
- [NDUH13] Nduhura-Munga, J.; Rodriguez-Verjan, G.; Dauzere-Peres, S.; Yugma, C.; Vialletelle, P.; Pinaton, J.: A literature review on sampling techniques in semiconductor manufacturing. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 26(2), S. 188 – 195, 2013
- [NEAT12] Neath, A. A.; Cavanaugh, J. E.: The Bayesian information criterion: background, derivation, and applications. *WIRES Comp Stat* 4, 2, S. 199 – 203, 2012
- [NUNE96] Núñez, J. A.; Cincotta, P. M.; Wachlin, F. C.: Information Entropy. In: Muzzio, J. C.; Ferraz-Mello, S.; Henrard, J. (Eds.): *Chaos in Gravitational N-Body Systems*, S. 43 – 53, Springer, Netherlands, Dordrecht 1996
- [PFEI21] Pfeifer, T.; Schmitt, R. (Eds.): *Masing Handbuch Qualitätsmanagement*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2021
- [PILL16] Pillai, P.; Kaushik, A.; Bhavikatti, S.; Roy, A.; Kumar, V.: A Hybrid Approach for Fusing Physics and Data for Failure Prediction. *International Journal on Prognostics and Health Management*, 2016
- [POR19] Por, E.; van Kooten, M.; Sarkovic, V.: Nyquist-Shannon sampling theorem. *Leiden University*, 1, 1, 2018
- [ROBN03] Robnik-Šikonja, M.; Kononenko, I.: Theoretical and empirical analysis of ReliefF and RReliefF. *Machine learning*, 53 (1), S. 23 – 69, 2003
- [RUSS16] Russel, S. J.; Norvig, P.: *Artificial Intelligence – A Modern Approach*. Third Edition, Pearson Education Limited, Essex 2016
- [SCHM16] Schmitt, R.; Kukulies, J.: Leitfaden zur Gestaltung einer ganzheitlichen Prüfplanung. Anwender-Leitfaden und CD-ROM: IGF-Vorhaben 17548N der Forschungsgemeinschaft Qualität e.V.: über die AIF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. FQS-DGQ-Band 84-10. FQS – Forschungsgemeinschaft Qualität e.V., Frankfurt am Main 2016
- [SON14] Son, S.; Yahya, B.; Song, M.; Choi, S.; Hyeon, J.; Lee, B.; Sung, N.: Process mining for manufacturing process analysis: a case study. In: *Proceeding of 2nd Asia Pacific Conference on Business Process Management*, Brisbane, Australia July 2014
- [SONG13] Song, C.; Liu, F.; Huang, Y.; Wang, L.; Tan, T.: Auto-encoder Based Data Clustering. In: *Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision, and Applications, Lecture Notes in Computer Science*. S. 117 – 124, Springer, Berlin Heidelberg 2013
- [VDA21] *Verband der Automobilindustrie e. V.*: VDA Band 5 Mess- und Prüfprozesse. Eignung, Planung und Management. Druck- und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG, Frankfurt am Main, 3., überarbeitete Auflage 2021
- [WIED10] Wiedenbeck, M.; Züll, C.: Clusteranalyse. In: Wolf, C.; Best, H. (Eds.): *Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse*. S. 525 – 552, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden 2010, DOI: 10.1007/978-3-531-92038-2_21
- [WU15] Wu, R.; Xu, J.; Srikant, R.; Massoulié, L.; Lelarge, M.; Hajek, B.: Clustering and inference from pairwise comparisons. In: *Proceedings of the 2015 ACM SIGMETRICS International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems*, pp. 449 – 450, June 2015
- [ZHAN19] Zhang, W.; Yang, D.; Wang, H.: Data-driven methods for predictive maintenance of industrial equipment: A survey. *IEEE Systems Journal*, 13 (3), S. 2213 – 2227, 2019
- [ZOU06] Zou, H.; Hastie, T.; Tibshirani, R.: Sparse Principal Component Analysis. *Journal of Computational and Graphical Statistics* 15, 2, S. 265 – 286, 2006

4 Geometrische Produktspezifikation – vom Konstruktionsmerkmal zur Messgröße

Gunter Effenberger

4.1	Aufbau des Normensystems für die geometrische Produktspezifikation	40
4.2	Grundregeln der geometrischen Produktspezifikation	42
4.3	Größenmaße – Bemaßung und Tolerierung	47
4.3.1	Größenmaßelemente und Größenmaße	47
4.3.2	Tolerierungskonzept Hüllbedingung	52
4.3.3	Spezifizieren von Größenmaßelementen	54
4.3.3.1	Auswahl von Größenmaßmerkmalen	54
4.3.3.2	Festlegung von Grenzmaßen und Toleranzen für Größenmaße	54
4.4	Form, Richtung, Ort und Lauf geometrischer Elemente	56
4.4.1	Form-, Richtungs-, Orts- und Lauftoleranzen – Angabe in Zeichnungen	58
4.4.2	Formtoleranzen	60
4.4.3	Bezug und Bezüge	61
4.4.4	Richtungstoleranzen	63
4.4.5	Bezugssystem	66
4.4.6	Orsttoleranzen	69
4.4.6.1	Position, Koaxialität, Symmetrie	69
4.4.6.2	Linien- und Flächenprofil	71
4.4.7	Lauftoleranzen	73
4.4.7.1	Rundlauf – radial	73
4.4.7.2	Rundlauf – axial	74
4.4.7.3	Rundlauf in spezifizierter Richtung	75
4.4.7.4	Gesamtrundlauf – radial	75
4.4.8	Allgemeintoleranzen für Form und Lage	76
4.5	Weiterführende Aspekte der Geometrietolerierung	77

Vorbemerkungen

Mechanische, elektromechanische, elektronische, optische, akustische und andere technische Systeme unterschiedlicher Komplexität haben in den Einzelbestandteilen nahezu immer dimensionelle, geometrische Komponenten. Das Dimensionieren und Tolerieren von geometrischen Bauteilmerkmalen spielt daher seit jeher im Entwicklungs- und Konstruktionsprozess eine herausragende Rolle. Technische Zeichnungen waren und sind Informationsträger, welche die verifizierten und validierten Ergebnisse des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses an die produktionstherstellenden Bereiche weitergeben. Merkmals erzeugung (Produktion) und Merkmalsbewertung (Verifikation) sind nur über diesen Informationsträger möglich. Technische Normen unterstützen diesen Prozess, schaffen über Symbolsprachen eine Verständigungsbasis über Ländergrenzen hinweg. Die Internationale Normungsorganisation ISO hatte in den 1980er-Jahren erkannt, dass diese Verständigungsstandards im Bereich der Geometriemerkmale neu gefasst werden mussten. Gründe dafür waren u. a. der breite Einsatz von Computern im Bereich von Konstruktion, Fertigung und Qualitätsprüfung. Die beginnende Arbeitsteilung im weltweiten Maßstab (Globalisierung) sollte ebenfalls nicht an den Sprachbarrieren scheitern. In den 1990er-Jahren wurde deshalb das ISO-Normenvorhaben GPS ins Leben gerufen. *GPS* steht für *Geometrische*

Produktspezifikation: Vom Konstruktionsmerkmal bis zur Messgröße und den damit im Zusammenhang stehenden Messgeräten und -verfahren sollte ein System internationaler Standards diese genannten Trends unterstützen. Um das Jahr 2000 kamen durch den Stand der Technik neue Tendenzen hinzu, die traditionelle technische Zeichnung durch CAD-Datenmodelle, die neben der Nenngeometrie auch die entsprechenden Toleranzinformationen enthalten können, abzulösen. Eine Verifikation der Istgeometrie – erfasst durch Messmaschinen, Computertomografen, Multisensorsysteme, optische Systeme der Bildverarbeitung – gegen das CAD-Datenmodell ist vielerorts betriebliche Praxis geworden. Eine umfassende Novelle der GPS-Normen war ab 2010 die Folge, um jene neuen Tendenzen zu unterstützen.

Dieses Kapitel verfolgt das Ziel, die *wesentlichen* Aspekte des GPS-Normensystems bez. der Vereinbarung geometrischer Merkmale und der Toleranzzuordnung vorzustellen. Ein schwieriges Unterfangen, da allein die Grundnormen zur Beschreibung von Maß, Form und Lage, Oberflächenbeschaffenheit (Oberflächenrauheit im Profil und in der Fläche) und Oberflächenunvollkommenheiten mehr als 1000 Seiten umfassen. Die nachfolgenden Ausführungen können daher nur einen Überblick liefern, für vertiefende Betrachtungen ist das Lesen und Einarbeiten in die Normen unerlässlich.

4.1 Aufbau des Normensystems für die geometrische Produktspezifikation

Der grundlegende Aufbau des GPS-Normensystems wird in DIN EN ISO 14638 – Matrixmodell beschrieben. Die Normen sind hierarchisch aufgebaut (Bild 4.1).

Fundamentale (früher globale) Normen definieren grundlegende Anforderungen, die in allen Normen der darunterliegenden zwei Ebenen zutreffend sind und dort nicht wiederholt werden müssen.

In der zweiten Ebene der Hierarchie sind *allgemeine* Normen eingeordnet, die typische geometrische Merkmale betreffen und üblicherweise für unternehmensindividuelle Konstruktionen angewendet werden.

Für unternehmensindividuelle Konstruktionen kann es jedoch sinnvoll oder auch notwendig sein, auf ergänzende Standards zurückzugreifen. Vielfach führt das zu Kosteneinsparungseffekten, weil der Aufwand im Konstruktionsprozess durch Rückgriff auf anerkannte, bewährte Regeln der Technik verringert werden kann. Zu den ergänzenden, *komplementären* Normen zählen die Standards, die bestimmte Aspekte von Fertigungsverfahren bez. ihrer Auswirkungen auf die Realisierung von Geometriemerkmalen zum Thema haben. Diese Normen sind häufig mit „Allgemeintoleranzen“ überschrieben. Sie enthalten im Gegensatz zu vielen Normen der darüberliegenden Gruppe „Allgemeine Normen“ konkrete Zahlenwerte für Größe oder Weite von Toleranzen für Maß, Form und Lage,

die zudem in Klassen strukturiert sind. In Abhängigkeit von funktionalen Anforderungen kann in der Phase der Konstruktion bei Kenntnis des anzuwendenden Herstellverfahrens eine geeignete Toleranzklasse festgelegt werden. Derartige Normen haben in Deutschland eine hohe Anwendungsakzeptanz, die mit der langen Tradition solcher Allgemeintoleranznormen zu begründen ist.

Normen aus der Gruppe der Maschinenelemente (Gewinde, Verzahnungen, Wälzlager, Keilnaben-Keilwellen-Verbindungen) komplettieren die untere Ebene der Hierarchie. In diesen Normen werden sowohl Geometriemerkmale definiert wie Gewinde- oder Verzahnungskenngrößen als auch Systeme von Toleranzen für diese Kenngrößen bereitgestellt.

Die Gruppe der „Allgemeinen Normen“ ist noch einem weiteren Systematisierungsaspekt unterzogen worden. Sieben Blöcke, die als Normenkettenglieder bezeichnet werden, decken die nachstehenden Themenbereiche ab (nach DIN EN ISO 14638).

A	<i>Symbole und Zeichnungsangaben</i> Normen, die Form und Proportionen von Symbolen, Angaben und Modifikatoren sowie die Regeln für ihre Anwendung festlegen
B	<i>Anforderungen an Geometrielemente</i> Normen, die Form, Größe, Richtung und Ort von Toleranzzonen oder die Definitionen von Parametern festlegen
C	<i>Merkmale von Geometrielementen</i> Normen, die Merkmale und Bedingungen von Geometrielementen festlegen, einschließlich der Prozesse der Partitionierung, Extraktion, Filterung, Assoziation, Kollektion und der Konstruktion

Matrix-Modell	ISO 14638
Konzepte, Prinzipien, Regeln	ISO 8015
Grundlagen	ISO 17450
1 Größenmaß	ISO 14405-1
2 Abstand	ISO 14405-2
3 Form	ISO 1101
4 Richtung	ISO 1101
5 Ort	ISO 1101
6 Lauf	ISO 1101
7 Oberflächenbeschaffenheit: Profil	ISO 1302
8 Oberflächenbeschaffenheit: Fläche	ISO 1302
9 Oberflächenunvollkommenheit	ISO 8785

Aufgeführte Normen sind ausgewählte Beispiele.

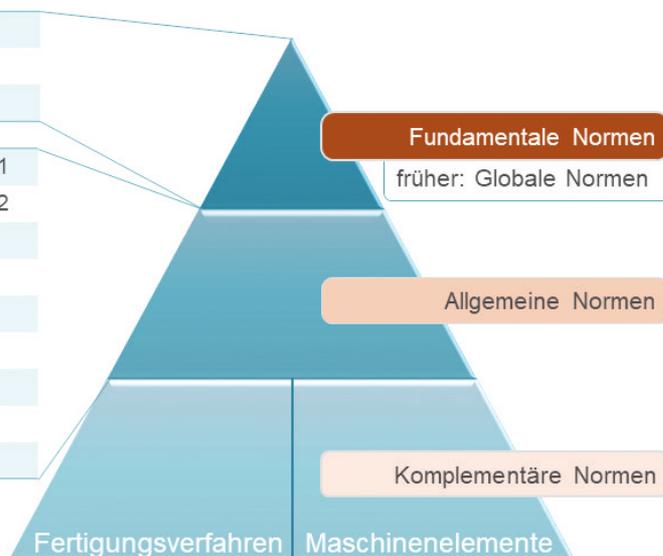


Bild 4.1 Hierarchie der GPS-Normen nach DIN EN ISO 14638



D	<i>Übereinstimmung und Nicht-Übereinstimmung</i> Dies sind Normen, die Anforderungen an den Vergleich von Anforderungen der Spezifikation mit den Verifizierungsergebnissen festlegen. Hierunter zählen auch Normen, die die Messunsicherheit behandeln.
E	<i>Messung</i> Normen, die Anforderungen an die Messung von Geometrie-Elementen und Bedingungen festlegen
F	<i>Messgeräte</i> Normen, die Anforderungen an die für die Messung verwendeten Geräte festlegen
G	<i>Kalibrierung</i> Normen, die Anforderungen an die Kalibrierung und Kalibrierverfahren für Messgeräte festlegen

dingsregeln, um auf der Grundlage von Messungen oder Prüfungen eine Aussage zur Konformität mit den Vorgaben treffen zu können. In Bild 4.2 sollen diese Zusammenhänge verdeutlicht werden.

In der Phase des SPEZIFIZIERENS sind die physikalischen Funktionen eines Bauteiles zu definieren und daraus für die Geometriemerkmale Zielfunktionen abzuleiten. Diese führen zu geometrischen Solleigenschaften, die mit Nennmerkmalen zu beschreiben und mit zulässigen Abweichungen (Toleranzen) zu verknüpfen sind. In der Phase der Produktherstellung (PRODUZIEREN) werden die Merkmale erzeugt. Einflussgrößen in diesen Prozessen führen dazu, die zur Verfügung gestellten Toleranzen für die Produktmerkmale anteilig auszunutzen. Zur Phase der Produktherstellung gehören die Prozesse der Qualitätssicherung und -lenkung (VERIFIZIEREN) dazu. Das sind Mess- und Überwachungsprozesse, die einerseits

Für jede geometrische Eigenschaft ist damit sinnbildlich eine siebengliedrige „Kette“ von Normen existent, die vom Definitionsprozess für Merkmale (Spezifizieren) – A und B – bis zum Nachweisprozess, dass diese Anforderungen erfüllt sind (Verifizieren) – C, E und F – reicht. Jede Kette enthält mit den Kettengliedern D und G auch Entschei-

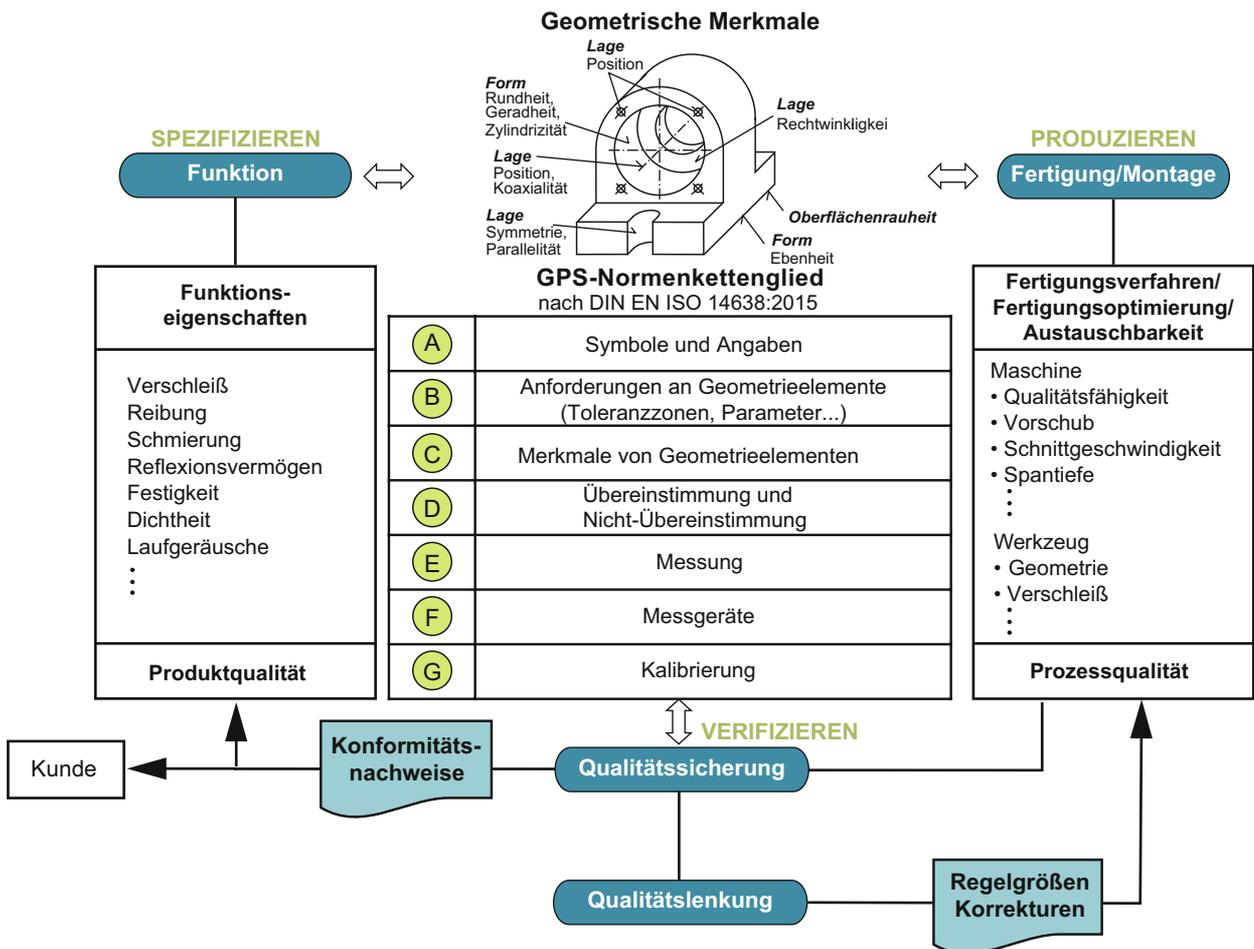


Bild 4.2 Normbasierte Themenblöcke (Kettenglieder) für die allgemeinen GPS-Normen

zu dokumentierten, rechtssicheren Konformitätsausagen führen und andererseits Stellgrößen für Korrekturen des Herstellprozesses liefern. In dieser Prozesskette SPEZIFIZIEREN → PRODUZIEREN → VERIFIZIEREN ist die Anwendung verschiedenster Normen des GPS-Systems notwendig, um funktionierende Produkte wirtschaftlich herzustellen und mit zuverlässigen Konformitätsnachweisen auszuliefern. Die Anwendung dieser Normen liefert einen Beitrag zur Rechtssicherheit im nationalen, aber auch internationalen Geschäftsverkehr.

Alle Themen dieses Buches, die sich mit der Messung und Bewertung von geometrischen Merkmalen beschäftigen, sind daher mit der Anwendung einzelner Normen aus dem GPS-System unmittelbar verbunden.

4.2 Grundregeln der geometrischen Produktspezifikation

Grundsätzliche Regeln für das Aufstellen und Interpretieren von geometrischen Produktspezifikationen werden in der fundamentalen GPS-Norm DIN EN ISO 8015 festgelegt. Die Tragweite dieser Grundsätze macht es notwendig, einige davon vorzustellen.

Für das Formulieren dieser Regeln ist von folgenden, idealisierten Annahmen ausgegangen worden.

Tabelle 4.1 Annahmen zum Lesen von Zeichnungen für die geometrischen Merkmale (nach DIN EN ISO 8015)

Funktionsgrenzen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Funktionsgrenzen beruhen auf einer vollständigen Untersuchung. ▪ Diese Untersuchung erfolgte experimentell oder theoretisch. ▪ Funktionsgrenzen sind ohne Unsicherheit bekannt.
Toleranzgrenzen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Toleranzgrenzen auf den Zeichnungen stimmen mit den Funktionsgrenzen überein.
Funktionsniveau	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ein Bauteil, dessen Merkmale innerhalb der durch Toleranzen vorgegebenen Grenzwerte liegen, funktioniert. ▪ Ein Bauteil, dessen Merkmale nicht innerhalb der durch Toleranzen vorgegebenen Grenzwerte liegen, funktioniert nicht.

Die Annahme, dass die Toleranzgrenzen geometrischer Merkmale mit den Funktionsgrenzen übereinstimmen, ist in der betrieblichen Praxis selten richtig. Oft werden Sicherheitsbeiträge den Funktionsgrenzen zugeordnet und davon die Toleranzgrenzen abgeleitet. Die Ursachen dafür sind vielfältig: subjektive Unkenntnis der wahren Funktionsgrenzen; objektiv fehlende Kenntnisse des Zusammenhanges zwischen einer nichtgeometrischen Funktionseigenschaft und einer geometrischen Einflussgröße, subjektives Misstrauen gegenüber den Herstell- und Qualitätssicherungsprozessen, Respekt vor Kundenabnahmen u. v. w. m. Diese Sicherheitsbeiträge sind bekanntlich nicht transparent, sodass die dadurch verfügbaren „Handlungsspielräume“ erst in Fehlersituationen und in der Folge bei der Genehmigung von Bauabweichungen sichtbar werden.

Grundsatz der bestimmenden Zeichnung (Grundsatz 3 in DIN EN ISO 8015)

Für den Austausch von Produkten zwischen Lieferanten- und Kundenorganisationen wird die Produktspezifikation in Form von Zeichnungen in die Lieferverträge eingebunden. Die Zeichnung ist damit bestimmend und juristisch bindend. Alle Anforderungen an die Geometrie sollen unter Verwendung von GPS-Symbolen und GPS-Regeln darin vereinbart werden. Die Bezugnahme auf nationale und firmeninterne Regelwerke ist möglich. Der Begriff „Zeichnung“ wird dabei als Synonym für das gesamte Paket an Dokumentationen verstanden, welches die (geometrischen) Anforderungen an das Produkt enthält. Die 3-D-Datenmodelle gehören dazu, wenn in der Zeichnung auf den CAD-Datensatz mit eindeutiger Identifikation verwiesen wird.

Bild 4.3 stellt einen Ausschnitt einer Zeichnung für das Bauteil Lagerbock mit bemaßter 3-D-Darstellung bereit. Die Merkmale sind nummeriert , um in den folgenden Textabschnitten darauf zu referenzieren.

Grundsatz des Aufrufens (Grundsatz 1 in DIN EN ISO 8015)

Sobald ein Teilbereich des GPS-Systems auf einer Zeichnung aufgerufen wird, gilt das gesamte System als aufgerufen. Der sicherste Aufruf, da eindeutig und direkt, ist der Vermerk „Tolerierung ISO 8015“ (Bild 4.3) in der Nähe oder direkt im Titelfeld der Zeichnung. Teilbereiche des Systems, wie z. B. „Größenmaße nach ISO 14405“, „Form, Richtung, Ort und Lauf nach ISO 1101“, „Oberflächenrauheit nach ISO 1302“, „Oberflächenunvollkommenheiten nach ISO 8785“, rufen indirekt das ganze System

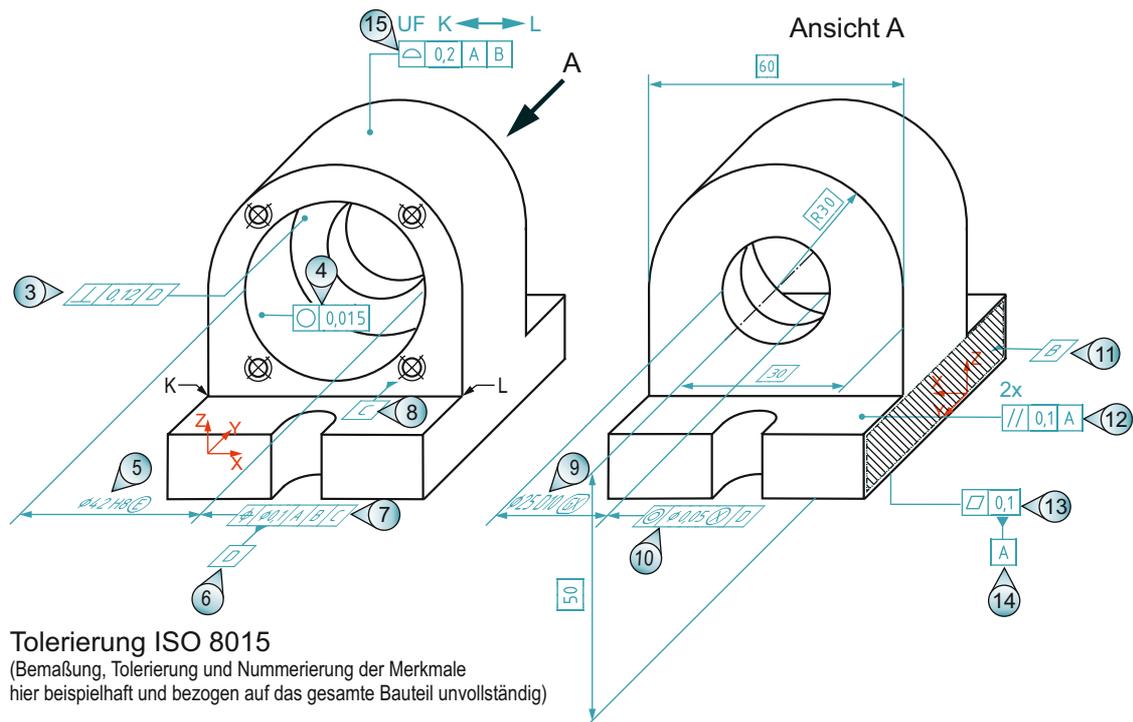


Bild 4.3 Bauteil Lagerbock – Ausschnitt aus der Zeichnung

auf. Das hat zur Folge, alle geometrischen Spezifikationen auf der Zeichnung richtig zu interpretieren, geeignete Mess- und Prüfverfahren anzuwenden und vertrauenswürdige Messergebnisse zu erhalten. Mit dem Aufruf des Gesamtsystems wird gleichsam vereinbart, die Messunsicherheit, mit der die Messergebnisse ermittelt worden sind, beim Konformitätsnachweis zu berücksichtigen (DIN EN ISO 14253).

Grundsatz des Geometrieelementes (Grundsatz 4 in DIN EN ISO 8015)

Ein Bauteil setzt sich aus einzelnen Geometrieelementen zusammen. Jede GPS-Spezifikation gilt für ein solches Geometrieelement (z.B. die Ebenheit einer Fläche) oder für eine Beziehung zwischen Geometrieelementen (z.B. die rechtwinklige Richtung einer Fläche zu einer Bezugsfläche). Von diesem Standard kann durch die im GPS-System verankerte Symbolsprache abgewichen werden. So sind Toleranzzonen für mehrere einzelne Geometrieelemente kombinierbar oder es können mehrere Geometrieelemente zu einem neuen Geometrieelement vereinigt werden. Reale Körperkanten und „virtuelle“ Kanten bilden dabei die Grenzen des Geometrieelementes.

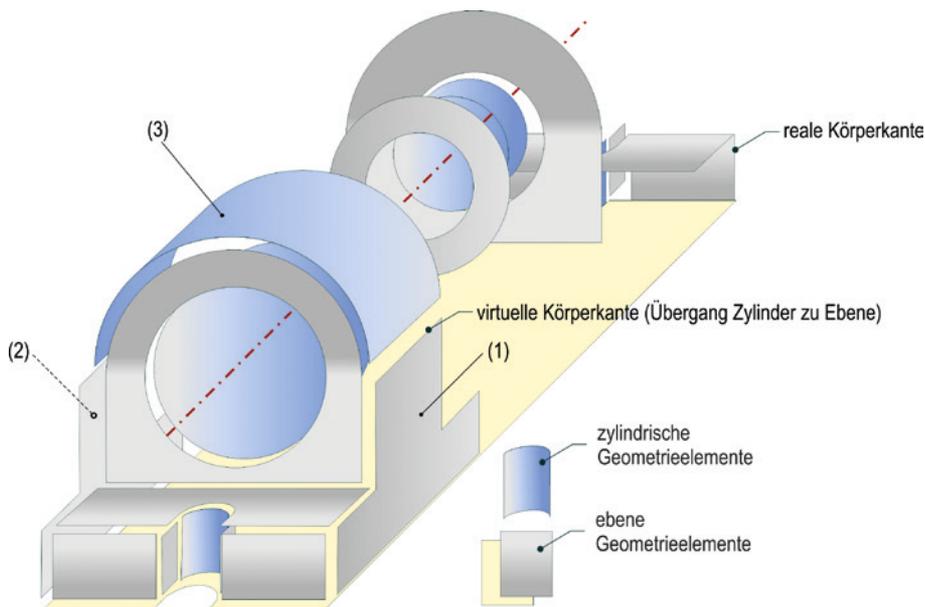
Die konsequente Umsetzung dieses Grundsatzes hat zu vielen neuen notwendigen Vereinbarungen auf den Zeichnungen und zu neuen Symbolen geführt. Gerade für das fehlerfreie maschinelle Auslesen eines bemaßten und

tolerierten 3-D-Datensatzes sind diese Konventionen unbedingt zu beachten.

Grundsatz der Unabhängigkeit (Grundsatz 5 in DIN EN ISO 8015)

Dieser Grundsatz ist von fundamentaler Bedeutung für das geometrische Design. Er zielt darauf ab, dass alle an ein Geometrieelement oder an eine Beziehung von Geometrieelementen gestellten Spezifikationen unabhängig voneinander erfüllt sein müssen. Das setzt ein Grundverständnis der tolerierbaren Eigenschaften im Designprozess voraus, um ggf. Wechselwirkungen zwischen den unabhängigen Spezifikationen zu erkennen und geeignete Toleranzen festzulegen.

Die Flächen (1) und (2) (Bild 4.4) ergeben in ihrem Abstand zueinander ein tolerierbares Größenmaßelement, müssen ggf. Ebenheitsanforderungen erfüllen und sollten eine bestimmte zulässige Oberflächenrauheit nicht überschreiten. Diese fünf Anforderungen (Größenmaß als Abstand beider Flächen, Ebenheit für jede Fläche und Oberflächenrauheit für jede Fläche) sind zu spezifizieren, also mit Grenzwerten in GPS-konformer Definition auf der Zeichnung einzutragen. Alle fünf Spezifikationen müssen unabhängig voneinander eingehalten werden.

**Bild 4.4**

Bauteil Lagerbock – Darstellung in Geometrielementen

Die Vereinigung der beiden Flächen (1), (2) mit dem Halbzylinder (3) ist als Alternative dazu möglich. Dieses vereinigte Geometrielement kann mit Anforderungen an das Flächenprofil  verknüpft werden, sodass die Bemaßung und Tolerierung von Größenmaß und Ebenheit der ebenen Flächen entfallen kann (Bild 4.3; Merkmal 15).

Hier wird dem Grundprinzip der Standardisierung Rechnung getragen. Nach Möglichkeit sollte in der Praxis der industriellen Produktentwicklung von diesen Standardvorgaben (Defaults) reger Gebrauch gemacht werden. Modifikatoren kommen nur dann zum Einsatz, wenn sie die Spezifikation eindeutiger machen und zu Messergebnissen mit kleiner Messunsicherheit führen.

Der Grundsatz der Unabhängigkeit kann durch Modifikatoren, die das GPS-System bereitstellt, außer Kraft gesetzt werden. Das kann zu einigen Vorteilen im Hinblick auf die Sicherung der Funktion, erleichterte Herstellung und günstigere Messung resp. Prüfung führen. Das Aufheben des Unabhängigkeitsprinzips kann z. B. durch Vereinbarung der Hüllbedingung, Maximum-Material-Bedingung oder Minimum-Material-Bedingung erfolgen.

Grundsatz der Standardfestlegung (Grundsatz 7 in DIN EN ISO 8015)

In den Normen zur geometrischen Produktspezifikation werden für die Beschreibung geometrischer Eigenschaften Standards (dort als Defaults bezeichnet) vorgegeben. Diese Standards führen zu einfachen und überschaubaren Symbolen für die Codierung auf der Zeichnung. Von diesen Standards kann in begründeten Fällen (Funktion, Fertigung, Messung) abgewichen werden. Dafür sind Modifikatoren eingeführt, welche die Standardfestlegungen (Defaults) ändern.

Grundsatz der Referenzbedingung (Grundsatz 8 in DIN EN ISO 8015)

Grundsatz 8 führt aus, dass sich geometrische Produktspezifikationen auf die in ISO 1 festgelegte Referenztemperatur von 20 °C beziehen. Das gilt sowohl für die Spezifikation (Erfordernis, die Merkmalsauslegung bei Anwendungstemperatur auf die Referenztemperatur zurückzurechnen) als auch für die Verifikation (Erfordernis, Bauteile bei Referenztemperatur zu messen oder Messergebnisse um den Temperatureinfluss zu korrigieren). Außerdem muss das Bauteil frei von Verunreinigungen sein. Diese Vorgabe ist relativ unspezifisch und in Streitfällen zwischen Lieferanten und Kunden nicht belastbar. Es ist einer der Gründe, dass messbare Anforderungen an die technische Sauberkeit von Bauteilen zunehmend auf den Zeichnungen zu finden sind.

Grundsatz der Funktionsbeherrschung (Grundsatz 11 in DIN EN ISO 8015)

Die Norm setzt voraus, dass jedem Bauteil bis in die Ebene der einzelnen Geometrielemente Funktionen zugewie-

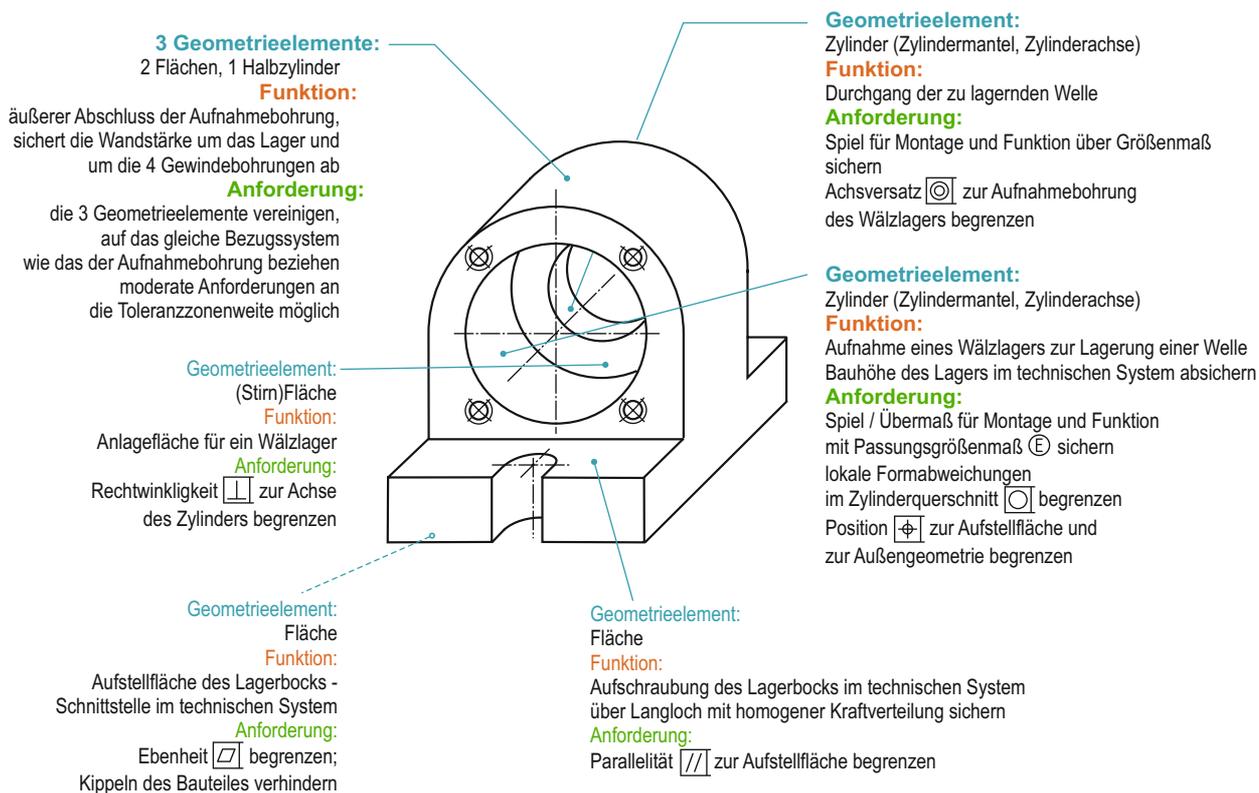


Bild 4.5 Bauteil Lagerbock – Funktionen

sen werden, die zu geometrischen Spezifikationen führen. Diese wiederum liefern Informationen zu den Messgrößen und zulässigen Grenzwerten (Toleranzen). Wenn alle Funktionen des Bauteiles über diese (geometrischen) Spezifikationen gesteuert werden, dann ist die Spezifikation vollständig.

Die in Bild 4.5 aufgeführten Funktionen führen zur Bemaßung und Tolerierung, wie in Bild 4.3 dargestellt. Die Auflistung von Funktionen ist bezogen auf die Gesamtfunktion des abgebildeten Bauteiles nicht vollständig.

Diese Regel passt sehr gut zum Ansatz der risikominimierenden Produktentwicklung, basierend auf dem Einsatz von Risikobewertungsmethoden wie der Ausfalleffektanalyse, FMEA oder FMECA. Die bei der Anwendung solcher Methoden erkannte Bedeutungsschwere von Merkmalen, wie Sicherheitsrelevanz, Relevanz gegenüber gesetzlichen Vorgaben, Relevanz bezüglich des Funktionsverhaltens eines technischen Systems oder Relevanz bez. des Erscheinungsbildes, sind für die nachfolgenden Realisierungsprozesse nützliche, wenn nicht gar unbedingt notwendige Eingangsinformationen. Im Bereich der Automobilindustrie ist die Kennzeichnung dieser Bedeutung auf den Zeich-

nungen mit firmenspezifischen Symbolen gekoppelt. Für alle Mess- und QS-Prozesse spielen diese Merkmale dann eine herausragende Rolle. Das GPS-Normensystem hat bez. dieser Betrachtung eine neutrale Position bezogen. Aktuell gibt es keine Konventionen, die Bedeutung von Merkmalen einheitlich nach international abgestimmten Vorgaben auf der Zeichnung zu vereinbaren.

Grundsatz der Dualität (Grundsatz 10 in DIN EN ISO 8015)

Der Grundsatz der Dualität legt fest, dass die geometrische Produktspezifikation grundlegende Informationen für den Mess- und Bewertungsprozess enthält, aber das konkrete Mess- und Bewertungsverfahren mit all seinen Randbedingungen nicht vorgibt. Die Art und Weise, wie die Messung und Bewertung (Verifikation) vorgenommen werden soll, setzt auf diesen Informationen auf und muss durch weitere Informationen ergänzt werden. Die Zulässigkeit solche Ergänzungen muss durch Messunsicherheitsbetrachtungen abgeschätzt werden.

Das Merkmal 9 in Bild 4.3 ($\varnothing 25 D10 \text{ (GX)}$) ist eine Bohrung als Durchlass für eine Welle. Es enthält eine Vorgabe an das größte einschreibbare Größenmaß als Maß der inneren Umgrenzung (s. Abschnitt 4.3.1). Mit welchen Messgeräten resp. Prüfmitteln dieses Merkmal erfasst wird, wie Grenzlehndorn, 2-Punkt-Bohrungsmessgerät, 3-Punkt-Bohrungsmessgerät, 3-D-Messmaschine, 3-D-Messarm u. w., bleibt davon unbetroffen. Auch die Anzahl von Messungen zugeordnet zu Mess Ebenen und Messachsen wird durch diese Spezifikation nicht vorgegeben.

Die Anforderungen auf der Zeichnung (Spezifikation) müssen zur Bereitstellung von Messwerten einschließlich der Konformitätsaussagen (Verifikation) führen. Dieser Informationsverarbeitungsprozess wird im GPS-System in DIN EN ISO 17450-1 beschrieben (Bild 4.6).

Die Zeichnung (Bild 4.6) gibt vor, die Grenzwerte für das Größenmaß und die Toleranz für die Zylinderform nicht auf den Default zu beziehen, sondern auf das Kriterium der kleinsten Summe der Abweichungsquadrate, auf das **Gauß-Kriterium**. Unterstellt werden

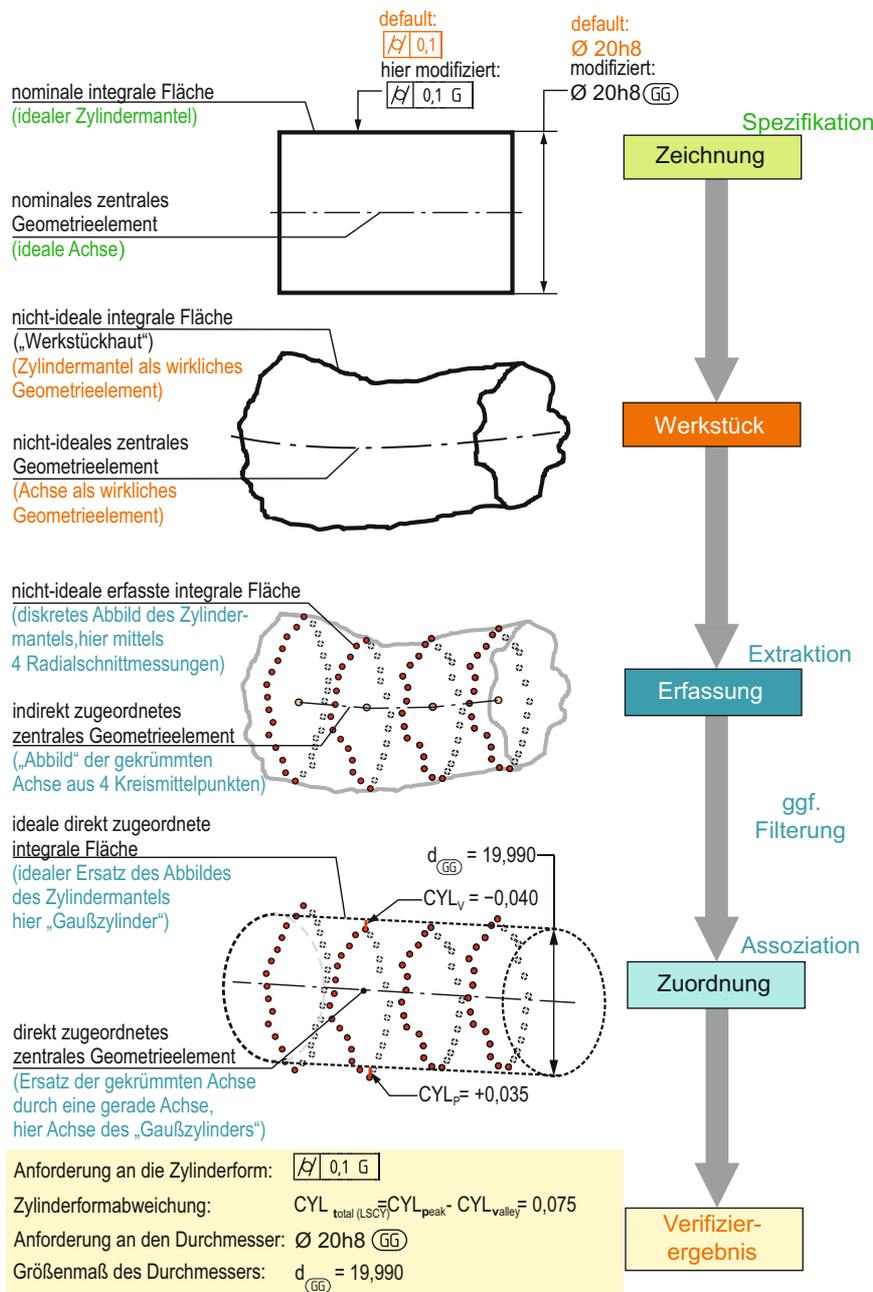


Bild 4.6
Von der Spezifikation (Zeichnung) zur Verifikation (Messergebnis)

muss, dass der Konstrukteur die Folgen auf die Funktion ausreichend bedacht hat. Der Verifizierende muss daher ein Messverfahren anwenden, das eine punktweise Erfassung des tolerierten Zylindermantels erlaubt und über eine Auswertesoftware verfügt, die das Berechnen von Ersatzelementen nach Gauß unterstützt. Diese Anforderungen stehen im Spezifikationsoperator (Zeichnungsangabe). Das Messergebnis ist abhängig von der Anzahl erfasster Messebenen (im Beispiel sind es vier), von der Messpunktanzahl und -verteilung je Messebene, den verwendeten Antastelementen (mechanisch/optisch) und einer ggf. aus messtechnischer Sicht vorgenommenen digitalen Filterung der Form je Radialschnitt. Diese genannten Aspekte ergänzen und erweitern den Spezifikationsoperator zum Verifikationsoperator. Der Grundsatz der Dualität wird durch dieses so bezeichnete Operator-konzept unterstützt.

Grundsatz der Verantwortung (Grundsatz 13 in DIN EN ISO 8015)

Wird durch eine mehrdeutige oder ungeeignete Produktspezifikation nicht sichergestellt, dass die Bauteilfunktionen gewährleistet sind, liegt das in der Verantwortung der Partei, die für die Produktspezifikation verantwortlich ist.

Die Größe der Messunsicherheit, die den Nachweis der Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit den Spezifikationen maßgeblich beeinflusst, liegt in Verantwortung der Partei, die für die Messung und die Konformitätsaussage verantwortlich ist.

Die im exakten Wortlaut – oben nicht direkt zitiert – relativ kompliziert geschriebene Regel lässt sich auf den einfachen Nenner bringen:

Nicht erkannte Konstruktionsfehler, die zum Streit- oder Haftungsfall führen, hat der Konstrukteur zu verantworten. Nicht erkannte Fabrikationsfehler, die zum Streit- oder Haftungsfall führen, hat die Fertigung mit paralleler oder nachgeschalteter Qualitätsprüfung zu verantworten.

Von dieser Regel sind durch das Aufrufen des GPS-Systems über die Zeichnung alle im Geschäftsprozess zur Produktherstellung beteiligten Unternehmen betroffen.

4.3 Größenmaße – Bemaßung und Tolerierung

Vorbemerkungen

Das System der geometrischen Produktspezifikation hat die traditionelle Form der Bemaßung von geometrischen Merkmalen überarbeitet und folgende Normen aus der Gruppe der Allgemeinen Normen (Bild 4.2) eingeführt:

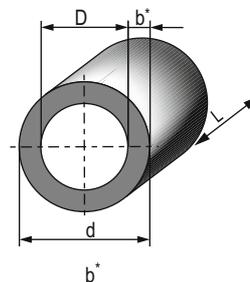
- DIN EN ISO 14405-1
Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Dimensionelle Tolerierung – Teil 1: Lineare Größenmaße (betrifft Durchmesser, Abstand parallel liegender Ebenen)
- DIN EN ISO 14405-2
Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Dimensionelle Tolerierung – Teil 2: Andere als lineare Maße (betrifft Stufenmaße, Abstände von Achsen und Mittelebenen)
- DIN EN ISO 14405-3
Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Dimensionelle Tolerierung – Teil 3: Winkelgrößenmaße

Der folgende Abschnitt bezieht sich ausschließlich auf den Teil 1 dieser Normengruppe, also auf lineare Größenmaße.

4.3.1 Größenmaßelemente und Größenmaße

Das GPS-System definiert in DIN EN ISO 14405-1 die dargestellten Größenmaßelemente (Bilder 4.7, 4.8, 4.9).

Zylinder



nur am Querschnitt eines „Rohres“ definiert!

Bild 4.7
Größenmaßelement Zylinder

- Durchmessermaße D , d (im Falle eines Flachteils wird der Zylinder reduziert auf einen Kreis)
- Längenmaß L (Abstand der parallelen Stirnflächen)
- Wandstärke b^* im Querschnitt eines Zylinderrohres

Kugel

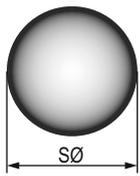


Bild 4.8
Größenmaßelement Kugel

- sphärischer Durchmesser $S\varnothing$

Parallelebenenpaar

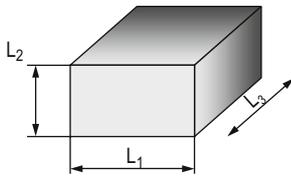


Bild 4.9
Größenmaßelement Parallelebenenpaar

- drei Längenmaße (Abstand parallel liegender Ebenen) L_1 , L_2 und L_3
- Der Quader wird im Fall eines rechteckigen Flachteiles zum Rechteck. Größenmaßelemente sind in diesem Sonderfall zwei Paare paralleler Geraden, z. B. die Geraden, die L_1 und L_2 bilden.
- Anmerkung: Der Begriff „Parallelebenenpaar“ wurde von Jordan (Jordan und Schütte 2017) geprägt und ist nicht genormt.

Größenmaßelemente sind durch einen Parameter, das eigentliche Größenmaß, in ihrer Abmessung (engl.: size; nicht dimension) bestimmt.

Diese Geometrielemente werden durch verschiedene Herstellverfahren am Bauteil erzeugt. Die Ungenauigkeiten dieser Verfahren führen dazu, dass jedes Größenmaß mit einer Toleranz zu verknüpfen ist, um eine kostenoptimale Herstellung in der Serien- und Massenfertigung sicherstellen zu können (s. Abschnitt 4.2)

Auf 2-D-Zeichnungen und 3-D-Darstellungen können Größenmaße und deren zulässige Abweichungen unterschiedlich vereinbart werden. Auch diese Konventionen sind in ISO 14405-1 vorgegeben.

Die Nennmaße mit Grenzabmaßen oder die absoluten Grenzwerte müssen mit einer definierten Messgröße verknüpft werden. Im System der GPS wird mit dem Default die Messgröße definiert, die der in Tabelle 4.2 aufgeführten Maßangabe zugeordnet wird. Dieser Default für Größenmaßelemente ist das Zweipunktgrößenmaß.

Werden Zylinder und Parallelebenenpaare, fallweise auch Kugeln, bez. ihres Größenmaßes gemessen, wird meist zu den üblichen Handmessgeräten gegriffen, wie Messschieber, Bügelmessschraube, Messtisch mit Längenmesstaster und den verschiedenen Bohrungsmessgeräten, die eine Zweipunktantastung ermöglichen. Diese Messgeräte erlauben es, relativ einfach und kostengünstig das Zweipunktgrößenmaß zu ermitteln. Die Größe der Toleranz und die Messunsicherheit, die bei diesen einfachen Verfahren erreicht werden kann, müssen dabei in einem vertretbaren Verhältnis zueinander stehen. Die Kapitel dieses Buches, die sich mit den Themen der Messsystemanalyse und der Prüf-

Tabelle 4.2 Vereinbarung von Größenmaßen und zulässigen Abweichungen (nach DIN EN ISO 14405-1)

Grundlegende GPS-Zeichnungseintragung für Größenmaßelemente		Beispiele (Angaben in mm)		
a	Nennmaß mit einer Toleranzcodierung nach DIN EN ISO 286-1 (Angabe einer Toleranzklasse für Sicherung einer Passfunktion. Die Größe der Toleranz ist codiert über den IT-Grundtoleranzgrad, das ist die Ziffer in der Buchstaben-Zahl-Kombination.)	50H9	$\varnothing 62k6$	165js10
b	Nennmaß \pm Grenzabmaße (Die Toleranz ist die Differenz von oberem zu unterem Grenzabmaß und vorzeichenfrei.)	$50^{+0,074}_0$	$\varnothing 62^{+0,021}_{+0,002}$	$165 \pm 0,080$
c	Angabe der beiden absoluten Grenzmaße (Die Toleranz ist die Differenz vom Höchstmaß zum Mindestmaß.)	50,074 50,000	60,021 60,002	165,08 164,02
d	Nennmaß (ohne Klammern und nicht im Rechteckrahmen) mit Bezugnahme auf eine Allgemeintoleranz aus einer Norm oder Tabelle. (Angegeben sind meist \pm -Grenzabmaße, keine Toleranzen.)	20 Allgemeintoleranzen ISO 2768-m (entspricht: $20 \pm 0,2$)		
e	Angabe eines absoluten Grenzwertes (für einseitig zu begrenzende Größenmaßelemente)	20,02max		19,5min

In den Tabellenzeilen b und c sind hier die Maßangaben aus Tabellenzeile a transformiert worden. Üblicherweise werden die Varianten in b und c für freie Abmaße, die nicht aus einem Toleranzsystem stammen, angewendet.

prozesseignung beschäftigen, gehen spezifisch auf dieses Thema ein.

Zweipunktgrößenmaß

Das Zweipunktgrößenmaß ist ein örtliches (lokales) Größenmaßmerkmal und als der Abstand zwischen zwei einander gegenüberliegenden Punkten auf einem Größenmaßelement festgelegt.

Anmerkung: Die Definition des Zweipunktgrößenmaßes ist hier im Vergleich zur DIN EN ISO 14405-1 vereinfacht wiedergegeben.

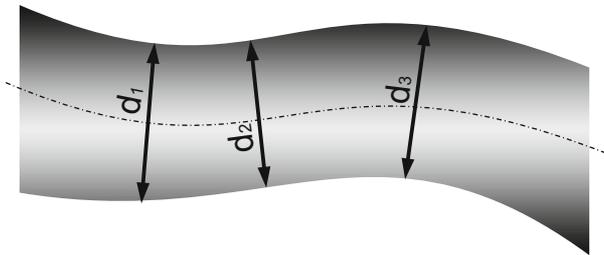


Bild 4.10 Zweipunktgrößenmaß Welle

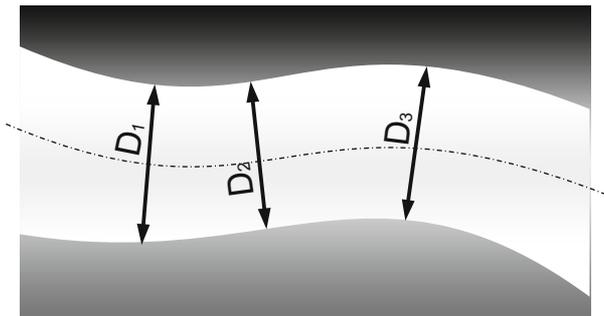


Bild 4.11 Zweipunktgrößenmaß Bohrung

Das Zweipunktgrößenmaß wird von den Gestaltabweichungen der erzeugenden Geometrieelemente beeinflusst, von der Zylinderform der Welle (Bild 4.10) und von der Zylinderform der Bohrung (Bild 4.11). Es wird deshalb entlang des Größenmaßelementes oder um das Größenmaßelement herum unterschiedlich groß sein.

Für die betriebliche Praxis ist es wichtig, dass sich die beiden Grenzmaße für das Zweipunktgrößenmaß sowohl auf das geometrische Merkmal an einem Bauteil beziehen als auch für die Gesamtheit dieses einen Merkmales über alle Bauteile gelten, die dieses Größenmerkmal haben und die in Serien- und Massenfertigung erzeugt werden. Diese Gesamtheit wird als Population bezeichnet. Sinnvoll ist es, für die Population auf Grundlage statistischer Aspekte eine zusätz-

liche, sogenannte Populationsspezifikation festzulegen. Bekannt sind diesbezüglich die Ppk- und Cpk-Spezifikationen, die eine breite Anwendung im Fahrzeugbau haben.

Der obere Grenzwert der Spezifikation begrenzt das am Größenmaßelement auftretende größte Zweipunktgrößenmaß, der untere Grenzwert begrenzt das am Größenmaßelement auftretende kleinste Zweipunktgrößenmaß. Die logische Folge ist, dass bei einer Konformitätsprüfung eines solchen Merkmales zwei Ergebnisse ausgewiesen werden müssen: das größte und das kleinste an einem Bauteil ermittelte Zweipunktgrößenmaß.

In der Konstruktion, also in der Phase der Bauteilauslegung, muss jedoch beachtet werden, dass das Zweipunktgrößenmaß bei bestimmten geometrischen Formen kritisch ist, wie Bild 4.12 aufzeigt.

Mit der Spezifikation für das Zweipunktgrößenmaß begrenzt der größte Durchmesser auch die äußere Umhüllung, jedoch nur für die Fälle Kegel, Tonne, Rotationshyperboloid und geradzahlige n-eckige Querschnitte (in Bild 4.12 als elliptischer Querschnitt dargestellt). Das Zweipunktgrößenmaß liefert keine Grenze für die äußere Umhüllung von gekrümmten Zylindern oder ungeradzahligen n-eckigen Querschnitten (in Bild 4.12 als dreieckiger Querschnitt dargestellt). Für die Geometrieelemente des Typs Parallelebenenpaar trifft die Aussage für die Krümmung (gekrümmte Platte, gekrümmte Nut) zu.

Bereits im Jahr 1905 hatte der Brite William Taylor die Unzulänglichkeit des Zweipunktgrößenmaßes für die Absicherung einer geometrischen Umgrenzung erkannt. Der von ihm begründete Taylorsche Grundsatz verlangte – vor allem bei Unkenntnis des verwendeten Fertigungsverfahrens und der aus diesem Verfahren resultierenden Zylinderformen – den für eine Paarung wichtigen Grenzzustand mit dem Maß der geometrischen Umgrenzung abzusichern. Trotz heutiger Fertigungsverfahren und heutiger Messtechnologien ist dieser Grundsatz immer noch von großer Bedeutung.

Die aufgeführten Nachteile des lokalen Größenmaßmerkmals Zweipunktgrößenmaß haben es notwendig gemacht, im System der GPS auch globale Größenmaßmerkmale zu definieren. Globale Größenmaßmerkmale liefern ein eindeutiges Ergebnis an einem Bauteil. Das zugeordnete Element ist vom gleichen Typ, also Zylinder, Kugel oder Parallelebenenpaar, und begrenzt das Größenmaßelement in seiner Gesamtausdehnung. Soll ein globales Größenmaßmerkmal angewendet werden, muss der Default modifiziert werden. Zur Kenntlichmachung dieser

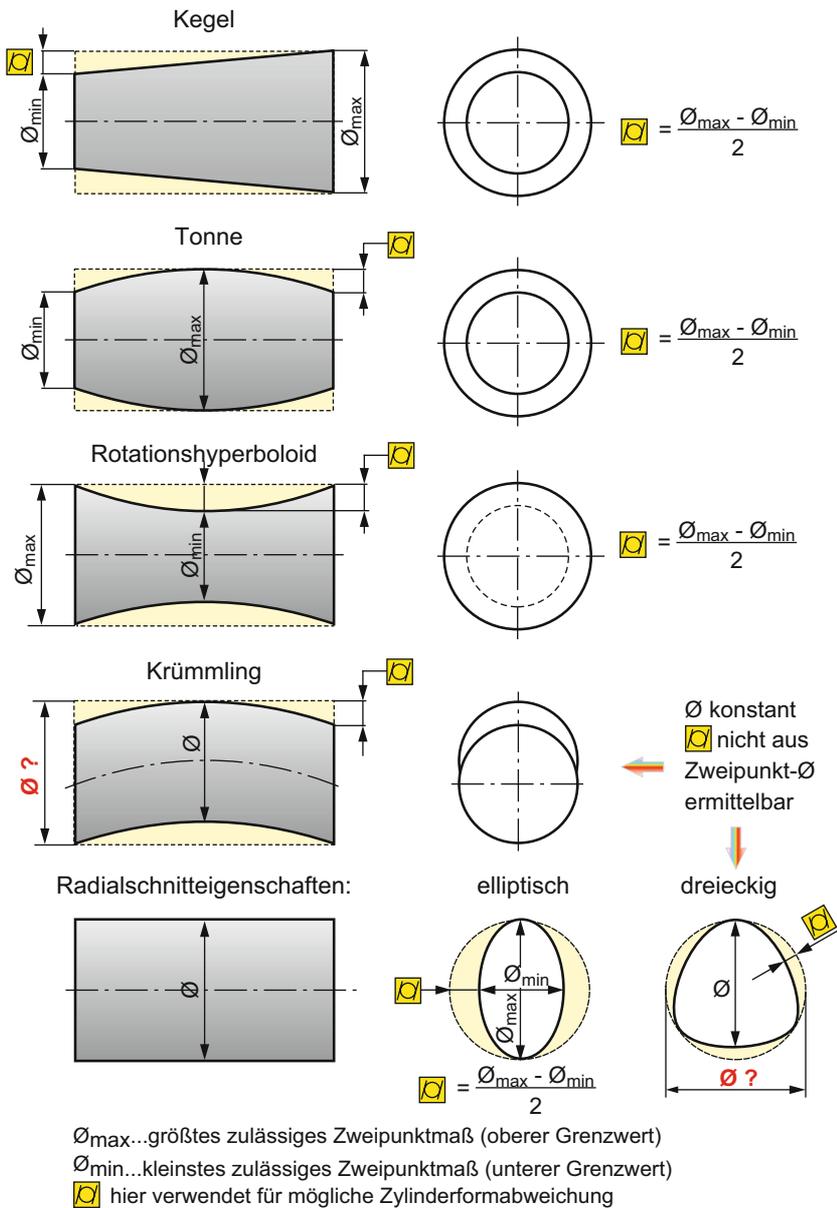


Bild 4.12
 Zweipunktgrößenmaß und Zylinderform an der Welle [in Erweiterung von (Trumpold et al. 1997)]

Modifikation gibt es verschiedene Symbole (s. DIN EN ISO 14405-1), von denen hier nur einige vorgestellt werden.

Maß des kleinsten umschreibbaren Geometrie-elementes (nach DIN EN ISO 14405-1)

Das globale Maß, welches aus dem (den) erfassten Geometrieelement(en) durch das Kriterium des kleinsten umschriebenen Elements festgesetzt wurde, wird als Maß des kleinsten umschreibbaren Geometrieelementes bezeichnet. Es wird vorzugsweise auf äußere Geometrieelemente (Wellen, Bolzen, Platten, Federn ...) angewendet. In

früheren Normen stand dafür das Paarungsmaß, der aktuelle alternative GPS-Begriff ist wirksames Größenmaß. In den messtechnischen Disziplinen wird auch vom Maß des Hüllelementes gesprochen.

Wie in Bild 4.13 zu sehen, ist das Maß der kleinsten umschreibbaren Hülle in Richtung und Ort frei. Es ist das Maß einer idealen Hülse, die mit kleinstmöglichem Durchmesser mit dem Zylindermantel über die gesamte Länge des Außenzylinders gepaart werden kann. Mit dem Symbol $\overline{\text{GN}}$ wird das Zweipunktgrößenmaß auf das Globale Maß des minimal umschreibbaren Geometrieelementes modifiziert.

Maß des größten einschreibbaren Geometrie-elementes (nach DIN EN ISO 14405-1)

Das globale Maß, welches aus dem (den) erfassten Geometrieelement(en) durch das Kriterium des größten einbeschriebenen Elements festgesetzt wurde, wird als Maß des größten einschreibbaren Geometrieelementes bezeichnet. Es wird vorzugsweise auf innere Geometrieelemente (Bohrungen, Löcher, Nuten, Schlitzte ...) angewendet. In früheren Normen stand dafür das Paarungsmaß, der aktuelle alternative GPS-Begriff ist wirksames Größenmaß. In den messtechnischen Disziplinen wird auch vom Maß des Pflerchelementes gesprochen.

Wie in Bild 4.14 zu sehen, ist das Maß des größten einschreibbaren Geometrieelementes in Richtung und Ort frei. Es ist das Maß eines idealen Bolzens, der mit größtmöglichem Durchmesser mit dem Zylindermantel über die gesamte Länge des Innenzylinders gepaart werden kann. Mit dem Symbol GX wird das Zweipunktgrößenmaß auf das Globale Maß des maximal einschreibbaren Geometrieelementes modifiziert.

Die Darstellungen (Bild 4.13; Bild 4.14) sind am Größenmaßelement Zylinder vorgenommen worden. Sie sind auf die Größenmaßelemente Kugel und Parallelebenenpaar sinngemäß zu übertragen. Werden diese Modifikatoren für ein Größenmaßelement genutzt, dann wird zwar die Umgrenzungsgeometrie zur werkstofffreien Seite begrenzt; die lokalen Formabweichungen bleiben jedoch unbegrenzt. Für eine Konformitätsaussage ist ein Messergebniswert notwendig.

Größenmaß der kleinsten Abweichungsquadrate (nach DIN EN ISO 14405-1)

Werden Größenmaßelemente durch Entnehmen von Messpunkten von realen Oberflächen erfasst (punktweise

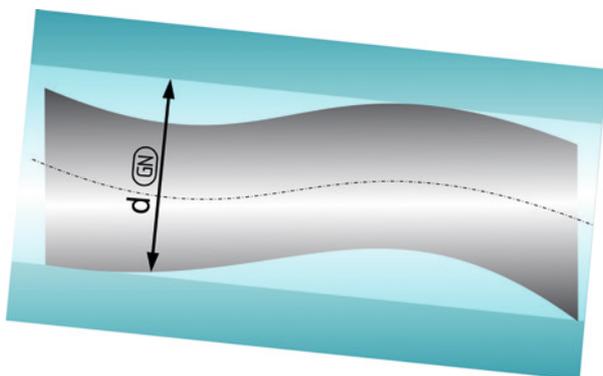


Bild 4.13 Maß des kleinsten umschreibbaren Geometrie-elementes

Abtastung von Zylindermantelflächen resp. ebenen Flächen in einem Koordinatensystem), dann sind zur Bestimmung des Größenmaßes aus den Messpunktkoordinaten Ersatzelemente zu berechnen. Diese Entnahme von Messpunkten wird auch als Extraktion bezeichnet. Seit den Anfängen der 3-D-Koordinatenmesstechnik ist ein solches Ersatzelement das Größenmaßmerkmal, ermittelt nach dem mathematischen Ansatz, die Summe der Abweichungsquadrate zu minimieren. Als Abweichungen sind hier die lokalen Formabweichungen zu verstehen, also die senkrechten Abstände jedes Messpunktes zu diesem Ersatzelement.

Mit dem Symbol GG wird das Zweipunktgrößenmaß auf das Globale Maß des Gaußschen Geometrieelementes modifiziert.

Genutzt werden Rechenalgorithmen auf Grundlage der von Carl Friedrich Gauß (1777–1855) in der Vermessungskunde eingeführten Ausgleichsrechnung von Wiederholmessungen. Das ist der Grund, diese Ersatzelemente in der Praxis, weniger in den GPS-Normen, als „Gauß-Elemente“ zu bezeichnen. In den GPS-Normen wird lediglich bei Bezugnahme auf die Ersatzelemente, gebildet nach der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate (ganz korrekt: der kleinsten Summe der Abweichungsquadrate), der Buchstabe G für Gauß genutzt.

Werden diese Modifikatoren bei einem Größenmaßelement verwendet, dann wird zwar das Größenmaß dieses Ersatzelementes begrenzt, aber nicht die zur minimalen Quadratsumme führenden Formabweichungen (Bild 4.15, Bild 4.16). Das muss bei der Anwendung dieser Modifikatoren in Spezifikationen beachtet werden. Für eine Konformitätsaussage ist ein Messergebniswert notwendig.

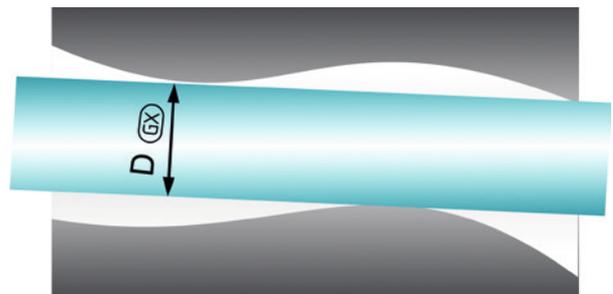


Bild 4.14 Maß des größten einschreibbaren Geometrieelementes

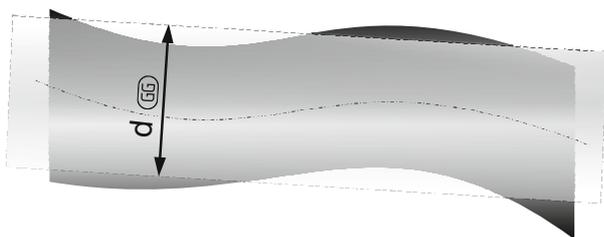


Bild 4.15 Maß der kleinsten Abweichungsquadrate, dargestellt am Größenmaßelement Welle

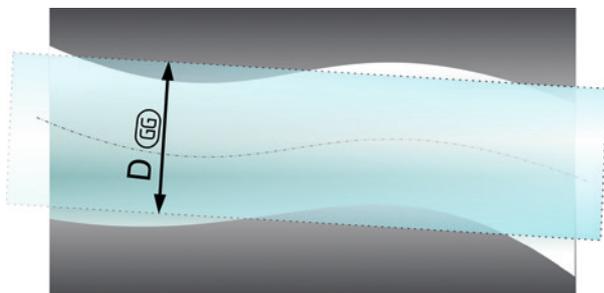


Bild 4.16 Maß der kleinsten Abweichungsquadrate, dargestellt am Größenmaßelement Bohrung

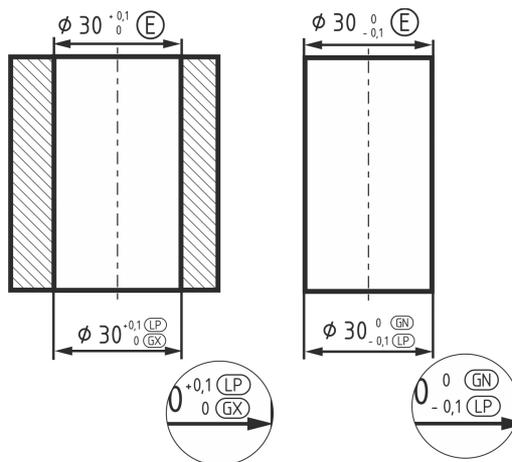


Bild 4.17 Vereinbarung der Hüllbedingung auf einer technischen Zeichnung

Der Modifikator (E) steht für Envelope und ruft die Hüllbedingung in der Definition von Tabelle 4.3 auf. Die Notation im unteren Teil der Zeichnung ist eine Alternative dazu und gibt im Detail Aufschluss, welcher konkrete Modifikator welchem Grenzmaß zuzuordnen ist. (LP) ist das Symbol für das Zweipunktgrößenmaß. Es sollte dann angegeben werden, um Verwechslungen auszuschließen und eindeutig die Hüllbedingung festzulegen. Würde es hier fehlen, könnte (GN) bzw. (GX) auf beide Grenzwerte bezogen werden.

4.3.2 Tolerierungskonzept Hüllbedingung

Die Hüllbedingung nach DIN EN ISO 14405-1 verknüpft ein globales mit einem örtlichen Größenmaßmerkmal. Sie setzt auf den weiter oben beschriebenen Taylorschen Grundsatz (s. Abschnitt 4.3.1) auf.

Die Gültigkeit der Hüllbedingung kann auf einer technischen Zeichnung nach DIN EN ISO 14405-1 auf zwei Wegen vereinbart werden (Bild 4.17).

Die Hüllbedingung begrenzt per Definition die Formabweichungen am tolerierten Größenmaßelement, wie im Bild 4.18 für Wellen dargestellt.

Die Hüllbedingung unterstützt die BauteilAuslegung im Hinblick auf die Funktion Paarung/Montage von Welle zu Bohrung oder Nut zu Feder. Vor allem bei der Sicherstellung von Mindestspielen zwischen den Paarungspartnern muss dieser Tolerierungsansatz bevorzugt werden. Aus diesem Grunde ist am Bauteil Lagerbock (Bild 4.3) die Aufnahmebohrung für das Wälzlager ($\phi 42 H8 (E)$, Merkmal 5) mit der Hüllbedingung verknüpft worden.

Die Hüllbedingung müsste korrekter Umgrenzungsbedingung genannt werden, da es nur bei äußeren Geometrieelementen eine einhüllende Umgrenzung gibt. Bei inneren Geometrieelementen pfercht das erfasste Geometrieelement die innere Umgrenzung ein.

Tabelle 4.3 Hüllbedingung (nach DIN EN ISO 14405-1)

Äußere Größenmaßelemente wie WELLEN, BOLZEN ...	Innere Größenmaßelemente wie BOHRUNGEN, NUTEN ...
Für den Vergleich mit dem zulässigen Höchstmaß ist das kleinste umschriebene Maßelement über die gesamte Länge des Größenmaßelementes zu verwenden. Anzuwenden ist der (GN)-Modifikator.	Für den Vergleich mit dem zulässigen Mindestmaß ist das größte einbeschriebene Maßelement über die gesamte Länge des Größenmaßelementes zu verwenden. Anzuwenden ist der (GX)-Modifikator.
An diesem Grenzmaß wird die Paarungsfähigkeit abgesichert. Daher kann es zweckmäßig sein, die gesamte Länge des geometrischen Elementes auf die funktionell wirkende Paarungslänge einzuschränken.	
Für den Vergleich mit dem zulässigen Mindestmaß ist das Zweipunktgrößenmaß zu verwenden.	Für den Vergleich mit dem zulässigen Höchstmaß ist das Zweipunktgrößenmaß zu verwenden.
An diesem Grenzmaß wird eine lokale Mindestwandstärke oder ein lokaler Mindestquerschnitt abgesichert.	

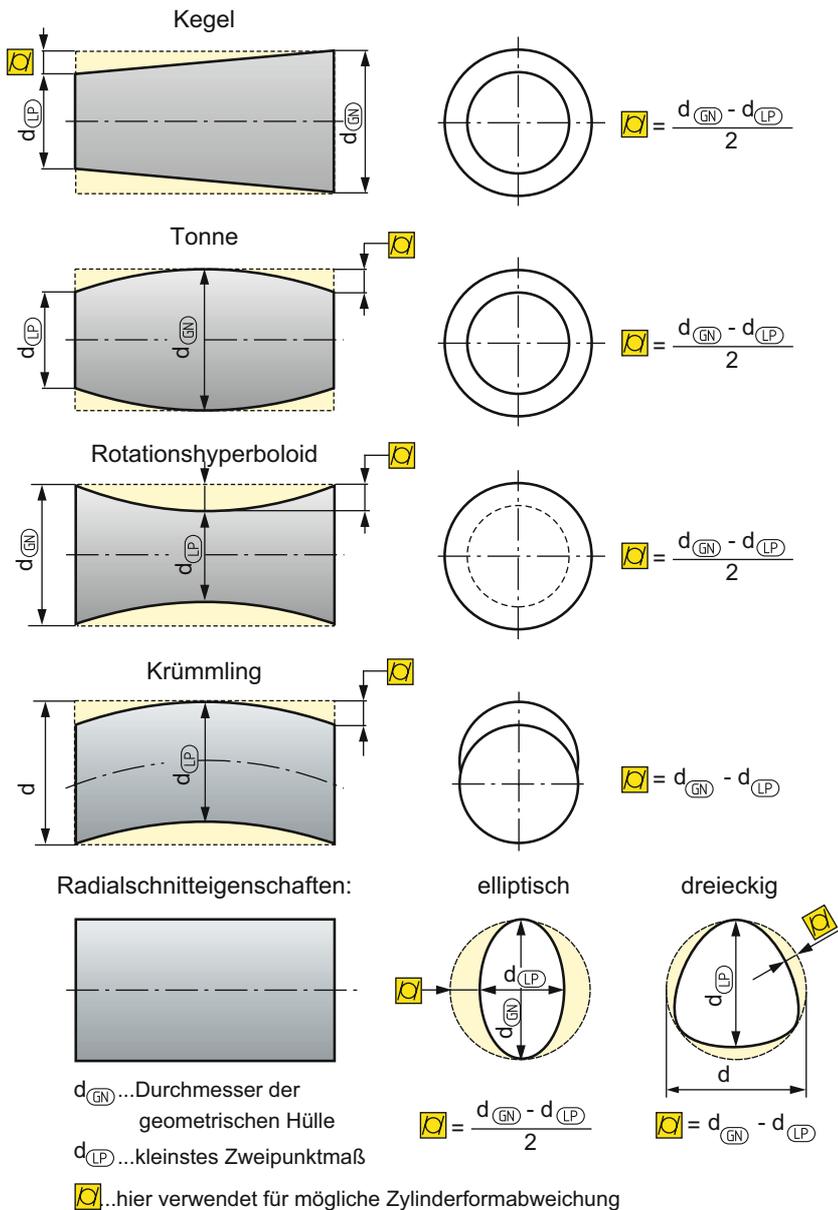


Bild 4.18
 Hüllbedingung begrenzt die Form, dargestellt am Bauteil Welle [in Erweiterung von (Trumpold 1997)]

Konformitätsaussagen an Größenmaßmerkmalen, die nach Hüllbedingung spezifiziert sind, benötigen daher zwei Messergebniswerte. Es ist von Vorteil, dem jeweiligen Ergebniswert den zugrunde liegenden Modifikator zuzuordnen. Das könnte ein Argument sein, statt des Modifikators E die direkt zugeordneten Modifikatoren GX , GN und LP zu verwenden.



Wichtiger Hinweis: Das Zweipunktgrößenmaß, das größte einschreibbare und das kleinste umschreibbare globale Größenmaß und das Maß der kleinsten Abstandskvadrat sind in DIN EN ISO 14405-1 an der erfassten 3-D-Geometrie eines Bauteiles widerspruchsfrei definiert. Für die Ausführungen hier ist bewusst das Zweipunktgrößenmaß als Messgröße für die noch gebräuchlichen Handmessmittel resp. stationäre Messeinrichtungen vorgestellt worden. Die globalen Merkmale der Umgrenzungsgeometrie sind an der mechanischen Gegengeometrie, wie sie üblicherweise in Lehren verwendet wird,

abgehandelt worden. Das entspricht dem herkömmlichen Denkmuster im geometrischen Design. Wie in Grundsatz 10 aus DIN EN ISO 8015 festgelegt, entscheidet der Konstrukteur letztendlich, welches Größenmaßmerkmal er aus Sicht der Funktion und seiner Risikobetrachtung spezifiziert. Der Verifizierende/Prüfende wiederum kann nach Grundsatz 10 frei entscheiden, ob er z.B. ein mit Hüllbedingung toleriertes Passungsmaß mit einer Grenzlehre überwacht oder mit einer 3-D-Koordinatenmessmaschine misst. Die „freie“ Entscheidung ist allerdings durch das Kriterium der Messunsicherheit, die in einem vertretbaren Verhältnis zur Toleranz stehen muss, eingeschränkt.

Zusätzlich ist darauf zu verweisen, dass DIN EN ISO 14405-1 noch weitere Größenmaßmerkmale und nützliche Codierungsvorschriften bietet, deren Vorstellung und Diskussion den hier zur Verfügung stehenden Rahmen sprengen würde.

4.3.3 Spezifizieren von Größenmaßelementen

Eine wichtige Aufgabe im Bereich der Bauteilauslegung ist die Festlegung von Toleranzen für die Größenmaßmerkmale. Der Konstrukteur hat zu diesem Zweck zu überlegen:

- Mit welchem Größenmaßmerkmal (Abschnitt 4.3.1) lässt sich die Bauteilfunktion am besten steuern resp. absichern?
- Wie groß müssen die Grenzwerte (indirekt damit die Toleranz) für das gewählte Größenmaßmerkmal sein, um die Funktion abzusichern und gleichzeitig eine kostenoptimale Fertigung und Prüfung zu garantieren?

4.3.3.1 Auswahl von Größenmaßmerkmalen

In DIN EN ISO 14405-1 werden die Größenmaßmerkmale beschrieben und es wird vorgegeben, wie diese zu vereinbaren resp. zu modifizieren sind, konkrete Anwendungshinweise fehlen jedoch. Tabelle 4.4 gibt einige solcher Hinweise; ohne den Anspruch zu erheben, vollständig und abschließend zu sein.

4.3.3.2 Festlegung von Grenzmaßen und Toleranzen für Größenmaße

Für das Festlegen von Grenzmaßen und Toleranzen gibt es in der Konstruktion verschiedene Lösungswege.

Toleranztransfer

Grenzwerte und Toleranzen werden aus bewährten und dem Stand der Technik entsprechenden Vorgängerkonstruktionen eher formal übernommen oder es werden betriebliche Konstruktionshandbücher für wiederkehrende Konstruktionsaufgaben genutzt.

Toleranzsynthese und -analyse

Über Toleranzsynthese (früher als Maßkettenberechnung bezeichnet) kann die Wirkung von einzelnen Größenmaßen von Einzelteilen auf ein Schlussmaß, das sich nach der Montage dieser Einzelteile in einem technischen System von selbst ergibt, berechnet werden. Sind für dieses Schlussmaß Funktionsgrenzen einzuhalten, ist ein Rückrechnen von diesen Grenzen auch auf die Einzelmaße möglich (Toleranzanalyse). Software zur 3-D-Simulation von Toleranzen unterstützen dieses Vorgehen.

Genormte Toleranzsysteme und Normteile

Kann bei einer Konstruktion auf genormte Bauteile zurückgegriffen werden, enthalten diese Normen Grenzwerte und Toleranzen für die Einbausituation und stellenweise auch Anwendungsempfehlungen.

Diese Normen greifen auf das Toleranzsystem für Längenmaße nach DIN EN ISO 286 zurück und geben zum Nennmaß eine *Toleranzklasse* an, z. B. $\varnothing 20\ k6$. Sind diese Normen vor November 2010 erschienen, wird mit der Angabe einer Toleranzklasse gleichsam die Hüllbedingung (Abschnitt 4.3.2) vereinbart. Bis November 2010 war die bloße Verwendung einer Toleranzklasse damit verbunden, die Hüllbedingung aufzurufen. Seit November 2010 wird auch bei Verwendung einer Toleranzklasse aus DIN EN ISO 286 der ISO GPS-Default, das Zweipunktgrößenmaß (Abschnitt 4.3.1), vereinbart.

Eine Übernahme von Grenzmaßen und Toleranzen aus diesen produktbezogenen Normen auf die konkrete Zeichnung sollte damit verknüpft werden, die Hüllbedingung oder den GPS-Default Zweipunktgrößenmaß (Unabhängigkeitsprinzip) oder andere Modifizierungen zuzuweisen. In Tabelle 4.5 werden beispielhaft solche Normen aufgeführt; auch diese erhebt nicht den Anspruch, vollständig zu sein.

Normen mit Allgemeintoleranzen

Allgemeintoleranzen beziehen sich auf ein konkretes Fertigungsverfahren, mit dem das Bauteil auch hergestellt

Tabelle 4.4 Anwendung von Größenmaßmerkmalen – Empfehlung

Zweipunktgrößenmaß (LP) nur anwenden, um Verwechslungen auszuschließen	
allgemein	<ul style="list-style-type: none"> ▪ normaler Anwendungsfall (Default im System der GPS) ▪ sowohl einfache als auch komplexe Messverfahren können für die Verifikation eingesetzt werden ▪ ggf. sind schon in der Produktspezifikation Messebenen, Messachsen und Hinweise zur Verdichtung der Zweipunktgrößenmaße zu statistischen Rangordnungsmerkmalen anzugeben (hier nicht beschrieben, nachzuschlagen in DIN EN ISO 14405-1)
speziell für Zylinder 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anwendung unkritisch, wenn Fertigungsverfahren genutzt werden, die weder Krümmlinge (Bild 4.12) noch dreieckige (Bild 4.12) resp. ungeradzahlige Polygone erzeugen
speziell für Parallelebenenpaare 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anwendung unkritisch, wenn das Fertigungsverfahren verhindert, dass sich im Parallelebenenpaar je eine konvexe und eine konkave Ebene bildet (z. B. krumme Platte)
Hüllbedingung (E)	
für Zylinder und Parallelebenenpaare 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ traditionelle funktionsorientierte Art der Tolerierung für Passungsmaße, z. B. aus dem Toleranzsystem von DIN EN ISO 286 ▪ sichert sowohl die Paarungsfunktion und als auch das Materialminimum ab ▪ ist beim Zeichnungstransfer aus dem bzw. in den Anwendungsbereich ASME Y14.5 (US-Standard für die Geometrietolerierung) zu benutzen ▪ Formabweichungen müssen nicht extra toleriert werden. ▪ bei der Verifikation: Aufhebung des Unabhängigkeitsprinzips beachten
Größenmaßmerkmal der kleinsten Abweichungsquadrate (GG)	
allgemein	<ul style="list-style-type: none"> ▪ für normale Anwendungen bei prognostizierter Verifikation mit komplexen Messmitteln (Handmessmittel und einfache Prüfvorrichtungen werden von vornherein ausgeschlossen) ▪ bei Merkmalen in Vorbearbeitungszuständen, die noch einmal verändert werden ▪ ggf. für Größenmaßmerkmale, die als Population statistisch überwacht werden sollen ▪ bei Werkstoffen, die keine saubere Berandung ermöglichen (Papier, Pappe, Holz, Verbundwerkstoffe, Werkstoffe für additive Verfahren) ▪ gelegentlich – nicht generell empfohlen – im Kunststoffspritzguss verwendet, um die Wirkung der Entformungsschrägen auf lokale Größenmaßmerkmale auszuschließen
speziell für Zylinder 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ um die Wirkung der Formabweichungen zu begrenzen, sollte (GG) mit  (Bild 4.20) kombiniert werden
speziell für Parallelebenenpaare 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ um die Wirkung der Formabweichungen zu begrenzen, sollte (GG) mit  und  (Bild 4.20) an den Begrenzungsflächen des Größenmaßelementes kombiniert werden
Größenmaßmerkmal des kleinsten umschreibbaren Geometrieelementes (GN)	
Größenmaßmerkmal des größten einschreibbaren Geometrieelementes (GX)	
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (GN) vorzugsweise für Außenmaße ▪ (GX) vorzugsweise für Innenmaße ▪ anwendbar, wenn funktionell der Verzicht auf die Hüllbedingung (Abschnitt 4.3.2), also die Kombination mit dem Zweipunktgrößenmaß, unkritisch ist ▪ körperliche Prüfung über Lehrgang als robustes, fertigungsnahes Prüfverfahren möglich

werden sollte. Auf der Zeichnung ist die anzuwendende und für die Funktion ausreichende Toleranzklasse nach den Vorschriften der entsprechenden Norm zu vereinbaren. In Tabelle 4.6 sind *beispielhaft* typische Normen für Allgemeintoleranzen aufgenommen worden. Es fehlen z.B. die Allgemeintoleranznormen für warm- und kaltgeschmiedete Schmiedeteile und Formteile aus Gummi.

Werden mehrere Allgemeintoleranznormen auf einer Zeichnung aufgerufen bzw. angewendet, kann es passieren, dass sich auf ein Merkmal mehrere Spezifikationen (Toleranzen) beziehen. Sind solche Widersprüche oder Uneindeutigkeiten durch ergänzende Texteinträge nicht beseitigt worden, ist nach dem Grundsatz der allgemeinen Spezifikation (Grundsatz 12 in DIN EN ISO 8015) die größte dem betrachteten Merkmal zuzuordnende Toleranz bindend.

Tabelle 4.5 Toleranzsysteme und typische Normteile

Norm	Inhalt
DIN EN ISO 286-1:2019	GPS – ISO-Toleranzsystem für Längenmaße – Teil 1: Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen Hinweis: Alle Angaben beziehen sich auf den ISO GPS-Default, das Zweipunktgrößenmaß.
DIN EN ISO 286-2:2019	GPS – ISO-Toleranzsystem für Längenmaße – Teil 2: Tabellen der Grundtoleranzgrade und Grenzabmaße für Bohrungen und Wellen Hinweis: Alle Angaben beziehen sich auf den ISO GPS-Default, das Zweipunktgrößenmaß.
DIN ISO 14:1986	Keilwellen-Verbindungen mit geraden Flanken und Innenzentrierung; Maße, Toleranzen, Prüfung Hinweis: Norm relativ alt, beim Transfer in die Zeichnung ist auf eine GPS-konforme Angabe zu achten
DIN ISO 4379:1995 (ISO 4378:2018)	Gleitlager – Buchsen aus Kupferlegierungen Hinweis: DIN-Norm relativ alt, beim Transfer in die Zeichnung ist auf eine GPS-konforme Angabe zu achten
DIN 1850-3:1998 DIN 1850-4:1998 DIN 1850-5:1998 DIN 1850-6:1998	Gleitlager – Teil 3: Buchsen aus Sintermetall Gleitlager – Teil 4: Buchsen aus Kunstkohle Gleitlager – Teil 5: Buchsen aus Duroplasten Gleitlager – Teil 6: Buchsen aus Thermoplasten Hinweis: Beim Transfer in die Zeichnung ist auf eine GPS-konforme Angabe zu achten.
DIN 620-2:1988	Wälzlager; Wälzlagertoleranzen; Toleranzen für Radiallager Hinweis: exemplarisch für die ganze Reihe von Normen zu Wälzlagern, beim Transfer in die Zeichnung ist auf eine GPS-konforme Angabe zu achten
DIN 471:2011 DIN 472:2017	Sicherungsringe (Halteringe) für Wellen – Regelausführung und schwere Ausführung Sicherungsringe (Halteringe) für Bohrungen – Regelausführung und schwere Ausführung Hinweis: exemplarisch für die ganze Reihe von Normen zu Sicherungsringen, beim Transfer in die Zeichnung ist auf eine GPS-konforme Angabe zu achten
DIN ISO 3601-1:2013	Fluidtechnik – O-Ringe – Teil 1: Innendurchmesser, Schnurstärken, Toleranzen und Bezeichnung Hinweis: exemplarisch für die ganze Reihe von Normen zu O-Ringen, beim Transfer in die Zeichnung ist auf eine GPS-konforme Angabe zu achten
DIN 3760:1996	Radial-Wellendichtringe Hinweis: Beim Transfer in die Zeichnung ist auf eine GPS-konforme Angabe zu achten.
und viele weitere Normen zu typischen Maschinenelementen, wie	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gewinde (z. B. Toleranzsystem für das metrische ISO-Gewinde) ▪ Verzahnungen (z. B. Zylinderräder und Zylinderradpaare mit Evolventenverzahnung) ▪ Federn ▪ Kupplungen ▪ mechanische Verbindungselemente (Stifte, Bolzen) 	

4.4 Form, Richtung, Ort und Lauf geometrischer Elemente

Vorbemerkungen

Die Absicherung der Bauteilfunktion ist allein auf Grundlage von Größenmaßen kaum möglich. Das System der GPS stellt hierzu das Tolerierungskonzept für die Form von Geometrieelementen, ihre Richtung zueinander oder zu einem Bezugssystem, ihren geometrischen Ort zu einem Bezug oder Bezugssystem und den Lauf von Zylindermantelflächen oder Planflächen zu einer Bezugsachse bereit.

In früheren Ausgaben der Geometrienormen war die Bezeichnung „Form und Lage von Oberflächen bzw. von Geometrieelementen“ gebräuchlich und sehr weit verbreitet. Noch im aktuellen Sprachgebrauch der Praxis wird häufig von Form und Lage oder Form- und Lagetoleranzen gesprochen. In den deutschen Übersetzungen der internationalen Normen ist man von dieser Verallgemeinerung der Begriffe Richtung, Ort und Lauf zu Lage inzwischen abgerückt.

Folgende Normen aus der Gruppe der allgemeinen GPS-Normen (Abschnitt 4.1) sind für diesen Zweck veröffentlicht worden.

- DIN EN ISO 1101 – Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf