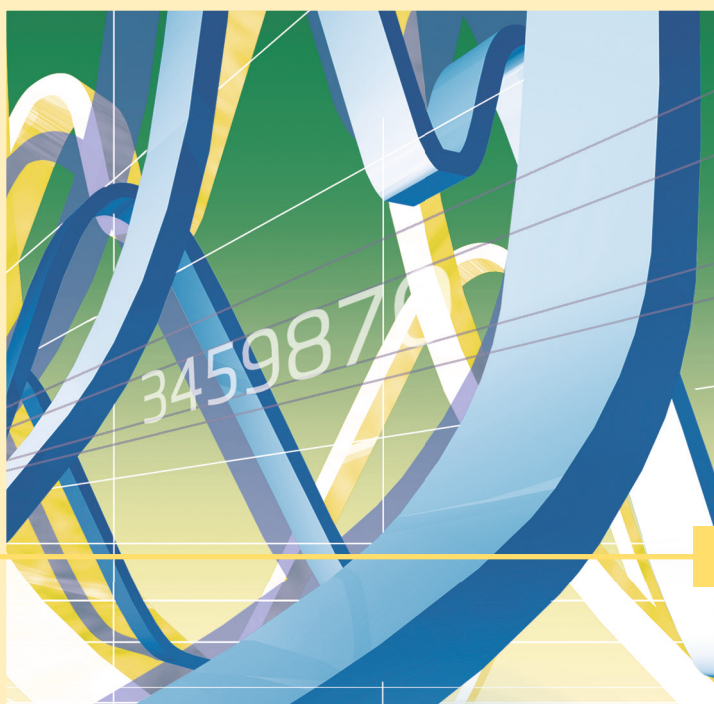


Edgar Dietrich
Stephan Conrad

Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation



8., aktualisierte Auflage

HANSER

Dietrich, Conrad

**Statistische Verfahren zur
Maschinen- und Prozessqualifikation**



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

Edgar Dietrich
Stephan Conrad

Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation

8., aktualisierte Auflage

HANSER

Die Autoren:

Dr.-Ing. Edgar Dietrich, Stephan Conrad, Q-DAS GmbH & Co. KG, Weinheim



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.

© 2022 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg

Herstellung: Cornelia Speckmaier

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

Coverrealisation: Max Kostopoulos

Satz: Eberl & Koesel Studio GmbH, Altusried-Krugzell

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN: 978-3-446-46447-6

E-Book-ISBN: 978-3-446-46504-6

Vorwort zur 8. Auflage

Das Beständige in der Welt ist der Wechsel. Zur achten Auflage dieses Buches wird Stephan Conrad unseren hoch geschätzten ehemaligen Kollegen, Co-Geschäftsführer und Mitbegründer der Q-DAS GmbH Herrn Dipl.-Ing. Alfred Schulze als Autor ablösen.

Wir können mittlerweile auf deutlich über 25 Jahre gemeinsame Erfahrung im Umgang mit statistischen Verfahren in der industriellen Produktion zurückblicken. Durch den nahezu täglichen Kontakt mit dieser Thematik über die weltweit verbreiteten Kunden von Q-DAS® ist ein großer Erfahrungsschatz mit den unterschiedlichsten Facetten und Forderungen entstanden, den wir mit diesem Buch weitergeben.

Zum Thema „Statistik“ werden mehrere klassische Lehrbücher angeboten, bei denen theoretische Abhandlungen im Vordergrund stehen, mit denen ein Praktiker aber nur bedingt etwas anfangen kann. Leider lassen auch viele der in den Büchern enthaltenen Verfahren den Praxisbezug vermissen, da sie zwar theoretisch anwendbar und korrekt sind, in der Praxis aus diversen Gründen aber kaum Anwendung finden.

Bereits bei der ersten Ausgabe dieses Buches stand nicht die Theorie im Vordergrund, sondern die Anwendung der beschriebenen Verfahren. Anhand von Fallbeispielen und Hinweisen wird der Zusammenhang mit Aufgabenstellungen aus der Praxis hergestellt.

Durch den vielfältigen Gedankenaustausch mit Entscheidern und Experten aus der Industrie und verschiedenen Gremien wie ISO, DIN, VDA, VDMA und VDI konnten einige der bekannten Verfahren erweitert werden, um noch aussagekräftiger und praxisrelevanter zu werden. Damit kann der Nutzen deutlich gesteigert werden, insbesondere dadurch, dass diese Verfahren in der Q-DAS® Software implementiert sind.

Heute können mit Hilfe von softwaretechnischen Lösungen komplexe Sachverhalte, Geschäftsvorfälle und Prozesse basierend auf qualitativ hochwertigen Informationen/Daten mittels statistischen Verfahren durch die sich daraus ergebenden Kenn-

größen und Kennzahlen ausreichend genau beschrieben werden, um diese beurteilen und mittels Benchmark sowie vorgegebenen Grenzwerten bewerten zu können. Dazu ist insbesondere die Darstellung der Ergebnisse im Kontext mit der jeweiligen Aufgabenstellung anhand von aussagefähigen Grafiken äußerst wichtig. Gerade hierauf wird in diesem Buch großer Wert gelegt.

Die Anwendung statistischer Verfahren hat in den letzten Jahren weiter zugenommen und wird künftig noch mehr an Bedeutung gewinnen. Dafür sprechen mehrere Gründe:

- Je komplexer die Sachverhalte sind und je mehr die Komplexität zunimmt, umso mehr ist man auf statistische Verfahren angewiesen.
- Um die Kosten für die Fertigung und Herstellung von Produkten senken zu können, muss der Prüfaufwand reduziert werden. Fähigkeitsnachweis und die statistische Prozessregelung tragen dazu bei.
- Das Thema „Big Data“ und „Predictive Analytics“ basierend auf statistischen Verfahren ist in aller Munde und wird mit der Umsetzung von Industrie 4.0 immer mehr in den Vordergrund rücken.
- Trotz ersten Schritten mit künstlicher Intelligenz (KI/AI) werden sich die dort in Vorbereitung befindlichen Methoden immer an den bekannten statistischen Grundlagen messen lassen müssen. Um Ergebnisse der KI als plausibel und korrekt validieren zu können, müssen sie immer den statistische Grundkonzepten entsprechen, die deshalb weiterhin bekannt und beherrscht sein müssen.

Das Buch soll dem Leser die zur Maschinen- und Prozessqualifikation benötigten statistischen Verfahren näherbringen, um ihn bei der praktischen Anwendung zu unterstützen. Auch wenn durch den Einsatz von Software der Werkzeugkasten der Statistik quasi zu einer Black Box wird, ist das Wissen, wann welches Verfahren anzuwenden ist und wie die Ergebnisse zu interpretieren sind, unumgänglich. Genau hierbei sollen die Inhalte des Buches einen Beitrag leisten. Gerne nehmen wir Anregungen und Änderungswünsche entgegen.

Mein Dank gilt Herrn Michael Radeck, der uns fachlich bei der Ausarbeitung unterstützt hat.

Q-DAS® stellt für das Buch eine Demoversion von qs-STAT® zur Verfügung, mit der die Fallbeispiele und die meisten Grafiken in dem Buch nachvollzogen werden können. Die verwendeten Datensätze werden mit der Software zur Verfügung gestellt. Laden Sie sich diese Version von der Q-DAS® Homepage (www.q-das.com) herunter oder fordern Sie die Software bei Q-DAS® direkt an.

Diese achte Auflage dieses Buches möchten wir Frau Heide Mesad widmen, die seit der ersten Auflage für das Layout und die textlichen sowie grafischen Ausarbeitungen verantwortlich war. Sie hat das Buch mit großem Einsatz und viel Herzblut gepflegt und ist zu unserem größten Bedauern nach kurzer Krankheit überraschend verstorben. Wir haben eine wunderbare Person und hoch geschätzte Kollegin verloren.

Weinheim, September 2021

Stephan Conrad/Edgar Dietrich

Inhalt

Vorwort zur 8. Auflage	V
1 Einleitung	1
1.1 Statistische Verfahren in der industriellen Produktion	1
1.2 Statistik als Basis qualitätsmethodischen Denkens und Handelns	2
1.2.1 Begrüßung	3
1.2.2 Einleitung	3
1.2.3 Beginn	4
1.2.4 Vor-Moderne	5
1.2.5 Walter Shewhart	7
1.2.6 Wirtschaftlichkeit	8
1.2.7 2. Weltkrieg	9
1.2.8 Stichproben	10
1.2.9 Von TESTA zur Deutschen Gesellschaft für Qualität	11
1.2.10 Denken in Wahrscheinlichkeiten	12
1.2.11 Herkunft der Ausgangsdaten	13
1.2.12 Statistische Arbeit	13
1.2.13 Auslegung durch den Leser	14
1.2.14 Abschluss	15
1.3 Anforderungen aus der Normung	15
1.4 Internationale Normung von statistischen Verfahren	19
1.5 Eignungsnachweis von Messprozessen	22
1.6 Statistical Process Control	23
1.7 DoE – Design of Experiments	28
1.8 Six Sigma	30

1.8.1	Entwicklung der Methode Six Sigma	30
1.8.2	Was ist Six Sigma?	30
1.8.3	Die Projektphasen bei Six Sigma in der Produktion	34
1.8.4	Six Sigma in der Entwicklung	36
2	Grundlagen der technischen Statistik	39
2.1	Einführung	39
2.2	Grundmodell der technischen Statistik	40
2.3	Klassifizierung von Produktmerkmalen	42
2.3.1	Merkmalsarten	42
2.3.2	Erfassung von Merkmalswerten	45
2.4	Klassifizierung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen	47
2.5	Definition des Vertrauensbereiches	50
2.6	Definition des Zufallsstrebereiches	52
2.7	Aufgabe der Wahrscheinlichkeitsfunktionen	53
2.8	Zusammenstellung der grundlegenden Verfahren	54
3	Ermittlung statistischer Kenngrößen	57
3.1	Tabellarische Darstellungen	57
3.2	Markante Kenngrößen einer Messwertreihe	62
3.3	Ergebnisdarstellung der Kennwerte	73
4	Markante Grafiken	79
4.1	Darstellung von Einzelwerten	79
4.2	Wertestrahl	89
4.3	Histogramm	90
4.4	Relative Summenhäufigkeit oder empirische Verteilungsfunktion	97
4.5	Prinzip des Wahrscheinlichkeitsnetzes	100
4.6	Darstellung von Wertepaaren	104
4.7	Darstellung von statistischen Kennwerten	108
4.8	Pareto-Analyse	111
4.9	Box-Plot	114
4.10	Übersicht Fähigkeitsindizes	118
4.11	Grafische und numerische Darstellung	125

4.12	Spezielle Toleranzbetrachtung	127
4.12.1	Überschreitungen der Toleranzgrenzen	128
4.12.2	Toleranzausnutzung	131
5	Wahrscheinlichkeitsverteilungen	133
5.1	Verteilungen für diskrete Zufallsvariablen	133
5.1.1	Hypergeometrische Verteilung	133
5.1.2	Binomialverteilung	137
5.1.3	Poisson-Verteilung	144
5.2	Verteilungen für kontinuierliche Zufallsvariablen	150
5.2.1	Normalverteilung	151
5.2.2	Mathematische Beschreibung der Normalverteilung	155
5.3	Verteilungen von Kenngrößen	162
5.3.1	t-Verteilung	162
5.3.2	χ^2 -Verteilung	165
5.3.3	F-Verteilung	167
5.4	Eingipflige unsymmetrische Verteilungen	169
5.4.1	Transformation	171
5.4.2	Logarithmische Normalverteilung	175
5.4.3	Betragsverteilung 1. Art	176
5.4.4	Betragsverteilung 2. Art (Rayleigh-Verteilung)	178
5.4.5	Weibullverteilung	180
5.4.6	Pearson-Funktionen	182
5.4.7	Johnson-Transformationen	183
5.5	Mehrgipflige Verteilungen	186
5.5.1	Mischverteilung über Momentenmethode	186
5.5.2	Mischverteilung durch Überlagerung	187
5.6	Zweidimensionale Normalverteilung	188
5.7	Zufalls- und Vertrauensbereiche	190
5.7.1	Zufallsstrebereiche	190
5.7.2	Vertrauensbereiche	192
5.7.3	Vertrauensbereich für Fähigkeitskennwerte	194

6	Numerische Testverfahren	197
6.1	Beurteilungskriterien mittels grafischer Darstellungen	198
6.2	Beschreibung der numerischen Testverfahren	199
6.2.1	Hypothesenformulierung und Testauswahl	200
6.2.2	Prüfgröße	201
6.2.3	Irrtumswahrscheinlichkeit	203
6.2.4	Testentscheidung	204
6.2.5	Fehlerrisiken bei der Testentscheidung	208
6.2.6	Operationscharakteristik	209
6.2.7	Power ($1 - \beta$)	210
6.2.8	Wichtige Einflüsse auf die Power von Testverfahren	212
6.2.9	Einseitige Testverfahren	214
6.2.10	Testplanung für den optimalen Stichprobenumfang	216
6.3	Tests auf spezielle Eigenschaften von Datenreihen	218
6.3.1	Test auf Zufälligkeit	218
6.3.2	Tests auf Trend	220
6.3.3	Tests auf Normalverteilung	225
6.3.4	Tests auf Ausreißer	236
6.4	Vergleich von Varianzen und Mittelwerten	241
6.4.1	Normalverteilte Messwertreihen	241
6.4.2	Nicht normalverteilte Messwertreihen	247
6.4.3	Test von Kruskal und Wallis	247
6.4.4	Levene-Test	249
6.5	Übersichtsdarstellung von Testergebnissen	251
7	Qualitätsregelkartentechnik	253
7.1	Was ist eine Qualitätsregelkarte?	253
7.2	Stichprobenentnahme und -frequenz	258
7.3	Gebräuchliche Qualitätsregelkarten	260
7.4	Qualitätsregelkarten für diskrete Merkmalswerte	261
7.4.1	Berechnung der Eingriffsgrenzen	263
7.4.2	Shewhart np-Karte (BV) für Anteilwerte	264
7.4.3	Shewhart np-Karte, Näherung auf Basis der Normalverteilung	271

7.4.4	Shewhart p-Karte (BV) für die Überwachung des Anteils fehlerhafter Einheiten	275
7.4.5	Shewhart p-Karte (NV) für Anteilswerte	278
7.4.6	Shewhart c-Karte für Ereignisse je Einheit (PV)	280
7.4.7	Shewhart c-Karte für Ereignisse je Einheit (NV)	288
7.4.8	Shewhart u-Karte für die Überwachung der mittleren Anzahl Fehler je Einheit	291
7.4.9	Shewhart u-Karte für Ereignisse je Einheit (NV)	294
7.5	Fehlersammelkarten	297
7.5.1	Aufbau einer Fehlersammelkarte	297
7.5.2	Erstellung einer Fehlersammelkarte	299
7.6	Qualitätsregelkarten für kontinuierliche Merkmale	304
7.6.1	Aufbau der Regelkarten	304
7.6.2	Vorgehensweise anhand einer \bar{x}/s -Karte	307
7.6.3	Stabilitätskriterien für Normalverteilung	314
7.6.4	Shewhart-Karten	325
7.6.5	Bewertung der verschiedenen Lage- und Streuungskarten	331
7.7	Annahmequalitätsregelkarten	333
7.7.1	Entstehung einer Annahmekarte	334
7.7.2	Fallbeispiele zur Annahmekarte	339
7.7.3	Eingriffsgrenzen der Annahmekarten	341
7.8	Shewhart-Karte mit gleitenden Kennwerten	342
7.9	Pearson- oder Johnson-Qualitätsregelkarten	345
7.10	Shewhart-Karten mit erweiterten Grenzen	347
7.10.1	Prozess mit zufälligen Schwankungen	347
7.10.2	Prozesse mit systematischem Trend	355
7.11	Qualitätsregelkarten und zeitabhängige Verteilungsmodelle	361
7.12	Stabilitätsstufen	364
7.13	Empfindlichkeit von Qualitätsregelkarten	368
7.14	Weitere Qualitätsregelkarten	374
7.14.1	Pre-Control-Regelkarten	374
7.14.2	CUSUM-Regelkarten	375
7.14.3	EWMA-Regelkarten	377

8	Prozessbewertung anhand diskreter Merkmale	379
8.1	Einleitung	379
8.2	DPU und DPO als Kennzahl für diskrete Merkmale	380
8.3	Fähigkeitskennzahlen für diskrete Merkmale	382
9	Prozessbewertung kontinuierlicher Merkmale	385
9.1	Allgemeines	385
9.2	Zeitabhängige Verteilungsmodelle	387
9.2.1	Zeitabhängiges Verteilungsmodell A1	389
9.2.2	Zeitabhängiges Verteilungsmodell A2	390
9.2.3	Zeitabhängiges Verteilungsmodell B	391
9.2.4	Zeitabhängiges Verteilungsmodell C1	392
9.2.5	Zeitabhängiges Verteilungsmodell C2	393
9.2.6	Zeitabhängiges Verteilungsmodell C3	394
9.2.7	Zeitabhängiges Verteilungsmodell C4	395
9.2.8	Zeitabhängiges Verteilungsmodell D	396
9.2.9	Qualitätsfähigkeit eines Prozesses	397
9.3	Typische Kenngrößen	398
9.3.1	Prozessleistung (Prozesspotenzial)	399
9.3.2	Kleinster Fähigkeitsindex C_{pk} (P_{pk})	401
9.3.3	Qualifikationsphasen und Indizes	403
9.3.4	Beherrscht und stabil	406
9.3.4.1	Stabilitätsbewertungen mit Analyse- Qualitätsregelkarten nach W. A. Shewhart	408
9.3.4.2	Stabilitätsbewertung mit einem statistischen Testverfahren	410
9.4	Allgemeine geometrische Methode $M_{l,d}$	412
9.4.1	Fähigkeitskenngrößen nach ISO 22514-2:2019	413
9.4.2	Bezeichnungen und Bestimmungsgleichungen für den Lageschätzer l nach ISO 22514-2	415
9.4.3	Bezeichnungen und Bestimmungsgleichungen für den Streuungsschätzer d nach ISO 22514-2	416
9.4.4	Zuordnung von Schätzmethoden zu den Verteilungs- zeitmodellen nach ISO 22514-02:2019	416

9.5	Fähigkeitsermittlung bei nicht definierten Verteilungsmodellen	417
9.6	Falsche Berechnungsmethoden	419
9.7	Kompensation der zusätzlichen \bar{x} -Streuung	421
9.8	Sonderfall – „Potenzial“ kleiner als Fähigkeit	423
9.9	Berechnungsmethode nach CNOMO	426
9.10	Kenngrößen für zweidimensionale Normalverteilungen	429
9.11	Grenzwerte für Qualitätsfähigkeitskenngrößen	435
10	Prozess- und Produktbeurteilung	439
10.1	Zeitliche Abfolge der Fähigkeitsbeurteilung	439
10.2	Auswahl der zeitabhängigen Verteilungsmodelle	443
10.2.1	Ausgangssituation und Zielsetzung	445
10.2.2	Vorbemerkungen	445
10.2.2.1	Testverfahren	445
10.2.2.2	Verteilungsmodell suchen	446
10.2.2.3	Verteilungsmodell Mischverteilung	448
10.2.3	Beschreibung einer Auswertestrategie im Einzelnen	449
10.2.4	Automatisierte Auswahl von zeitabhängigen Verteilungsmodellen	458
10.2.4.1	Überblick	458
10.2.4.2	Auswahl von Verteilungsmodellen	460
10.2.4.3	Beurteilungskriterien	461
10.2.4.4	Verteilungsmodell auswählen	465
10.3	Abnahmebedingungen für Fertigungseinrichtungen	475
10.4	Produkte bewerten	487
10.4.1	Prüfplan	487
10.4.2	Bewertung basierend auf Merkmalsergebnissen	487
10.4.3	Bewertung basierend auf Toleranzausnutzung	492
10.5	Automatisierte Auswertung	494
10.5.1	Anforderungen	495
10.5.2	Datenhaltung	496
10.5.3	Regelkreise	498
10.5.4	Auswertung und Berichtssystem	499
10.5.5	Nutzen	501

10.6	Datenverdichtung und Langzeitauswertung	502
10.7	Prozesssicht	511
11	Korrelations- und Regressionsanalyse	515
11.1	Grafische Analyse	516
11.2	Korrelationsanalyse	519
11.2.1	Der Korrelationskoeffizient nach Karl Pearson	520
11.2.2	Rangkorrelation	526
11.3	Regressionsanalyse	528
11.3.1	Einfache lineare Regression	528
11.3.1.1	Das Regressionsmodell	529
11.3.1.2	Berechnung des Regressionsmodells	530
11.3.1.3	Beurteilung des Regressionsmodells	533
11.3.2	Mehrfache und quasilineare Regression	541
12	Zuverlässigkeit	547
12.1	Bedeutung der Zuverlässigkeitsanalyse	547
12.2	Der Begriff Zuverlässigkeit	547
12.3	Die Zuverlässigkeitsprüfung	548
12.3.1	Der prinzipielle Ablauf einer Zuverlässigkeitsprüfung	548
12.3.2	Das Weibull-Verteilungsmodell	550
12.4	Fallbeispiele zur Zuverlässigkeitsprüfung	555
12.4.1	End-of-Life Tests	555
12.4.2	Zeitensierte Tests	557
12.5	Prüfplanung für einen Success-Run-Test	561
13	Firmenrichtlinie: Ford Testbeispiele	565
14	Anhang	603
14.1	Modelle der Varianzanalyse	603
14.1.1	Prozessbeurteilung	603
14.1.2	Varianzanalysetafel (ANOVA-Tafel)	605
14.1.3	Schätzen der unbekannt Parameter	605
14.2	Formelsammlung für Verteilungen	606
14.3	Tabellen	608

15	Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen	619
16	Literaturverzeichnis	623
Index	627

■ 1.1 Statistische Verfahren in der industriellen Produktion

Die in dem Buch beschriebenen statistischen Verfahren finden ihren Einsatz bzw. ihre Anwendung in erster Linie in der industriellen Produktion. Dazu zählen die Bereiche:

- Fertigungstechnik, mit der Herstellung und Montage von diskreten bzw. zählbaren Teilen
- prozesstechnische Produktion, bei der der Güterausstoß mengen- oder volumenorientiert gemessen wird, wie sie vornehmlich in der chemischen Industrie und der Nahrungsmittelindustrie zum Tragen kommen
- Verfahrenstechnik, mit der Verarbeitung von Rohmaterialien anhand kontinuierlicher und diskontinuierlicher Prozesse.

Sicherlich sind die meisten Verfahren auch auf andere Bereiche wie den Dienstleistungssektor übertragbar. Allerdings beschreibt das Buch keine Anwendungsbeispiele aus diesen Bereichen.

Heute sind diese Verfahren am weitesten in der Automobil- und Zulieferindustrie verbreitet. Insbesondere die Forderung aus Normen (IATF 16949:2016, IATF, 2016), Verbandsrichtlinien wie VDA (2008; 2016; 2020; 2021) oder QS-9000 (A.I.A.G., 1998) haben wesentlich zur Verbreitung beigetragen. Damit waren sowohl die Hersteller als auch die Zulieferer gezwungen, diese Verfahren umzusetzen. Viele Großkonzerne haben darauf basierend ihre eigenen firmenspezifischen Richtlinien (Daimler, 2008; General Motors, 2004; Robert Bosch, 2019; Volkswagen, Audi, 2005a und 2005b) erstellt und in Form von Verfahrensanweisungen verbindlich vorgeschrieben.

In der Automobil- und Zulieferindustrie, die hierfür sicherlich eine Vorreiterrolle spielte, wurden die Machbarkeit, die Sinnhaftigkeit und der Nutzen dieser Verfahren nachgewiesen. Aufgrund dieser positiven Erfahrung haben sie sich mittler-

weile auch auf andere Branchen und Industriezweige ausgebreitet. Zumal die Anwendung statistischer Verfahren beim Aufbau und Betrieb eines Qualitätsmanagementsystems nach ISO 9001 (DIN, 2015b) gefordert ist. Dabei beschränken sich diese Verfahren nicht nur auf die Massenfertigung, sondern können sehr wohl auch für Kleinserien bis hin zu komplexen Einzelteilen verwendet werden. Bei Kleinserien ist es in erster Linie der Vergleich mit zurückliegenden Chargen, um Trends und Veränderungen zu erkennen. Bei komplexen Einzelteilen mit in der Regel vielen Merkmalen ist es sehr häufig der Vergleich baugleicher Merkmale und deren Dokumentation, um die Rückverfolgbarkeit sicher zu stellen. Die Anwendung statistischer Verfahren ist in der Normung nicht nur gefordert, sondern auch selbst genormt (Abschnitt 1.3 und Abschnitt 1.4).

Die hier beschriebenen statistischen Verfahren können thematisch zu folgenden Anwendungsbereichen zusammengefasst werden:

- Eignungsnachweise von Prüfprozessen (Abschnitt 1.5)
- SPC Statistical Process Control (Prozessregelung und -überwachung) sowie Abnahme von Maschinen und Fertigungseinrichtungen (Abschnitt 1.6)
- DoE – Design of Experiments (Versuchsplanung, Abschnitt 1.7).

In der Ausbildung werden statistische Verfahren oft singular betrachtet und nicht im Gesamtkontext in Verbindung mit dem jeweiligen Einsatzbereich gesehen. Dies hat sich mit der Einführung von Six Sigma (Abschnitt 1.8) geändert. Dabei wird zwischen Six Sigma für die Produktion nach den DMAIC-Phasen und Six Sigma für die Entwicklung (DFSS – Design for Six Sigma) nach unterschiedlichen Phasenmodellen (z.B. IDOV) unterschieden. Jeder Phase sind dabei die entsprechenden statistischen Verfahren zugeordnet, wie sie sinnvollerweise angewandt werden sollen.

■ 1.2 Statistik als Basis qualitätsmethodischen Denkens und Handelns

Prof. Masing (Bild 1.1) hat anlässlich des Q-DAS[®]-Forums am 26. 11. 2003 den folgenden Vortrag gehalten. Er hat den Mitschnitt des Textes selbst korrigiert und der Fa. Q-DAS[®] zur Veröffentlichung freigegeben. Es war einer seiner letzten Auftritte vor seinem Tod am 29. März 2004. Sein Beitrag lebt von dem großen Erfahrungsschatz, den er in seinem langen Berufsleben gesammelt hat. Auch wenn der geschriebene Text nur sehr begrenzt den wundervollen Vortragsstil von Prof. Masing widerspiegeln kann, wollen wir aufgrund der historischen Bedeutung und der hervorragenden geschichtlichen Zusammenfassung die Abschrift hier wiedergeben.



Bild 1.1 Prof. Dr. Masing (* 22. Juni 1915 – † 29. März 2004) beim Q-DAS®-Forum 2003

Niemand anderes als Prof. Masing hätte in der heutigen Zeit besser über die Anwendung statistischer Verfahren in der industriellen Produktion berichten können, zumal er wesentlich an der Einführung und Verbreitung dieser Verfahren in Deutschland beigetragen hat. Für Q-DAS® ist es eine große Ehre, dass Prof. Masing diesen Vortrag ausgearbeitet hat:

1.2.1 Begrüßung

Meine sehr verehrten Damen, meine Herren,
mir liegt viel daran, den Organisatoren dieser Veranstaltung für die Einladung zu diesem Forum zu danken. Sie gibt mir Gelegenheit, vor einem fachlich qualifizierten Auditorium Anmerkungen zu einem Thema zu machen, dem ein guter Teil meiner Lebensarbeit gewidmet war. Zu dieser Thematik hat ja das Unternehmen, dessen Ehrentag wir heute gemeinsam feiern, bedeutsame Beiträge geleistet.

1.2.2 Einleitung

Wir unterscheiden bekanntlich beschreibende und schließende Statistik. Klassische Beispiele beschreibender Statistik finden wir im Statistischen Jahrbuch der Bundesrepublik Deutschland mit seinen Angaben über Tausende von Gegebenhei-

ten und deren Entwicklung in unserem Land, wie Bevölkerung, Flächennutzung, Industrieproduktion, Verkehr und vieles andere mehr. Diese Art Statistik wird sicher schon in prähistorischer Zeit genutzt worden sein. Die Archäologie stellt uns zwar darüber keine Beweise zur Verfügung, doch dürfen wir annehmen, dass schon unsere Altvorderen im Neandertal die Anzahl ihrer Schafe und Rinder festgehalten und untereinander verglichen haben.

Die ersten Beweise für beschreibende Statistik haben wir aus einer Jahrzehntausende späteren Zeit. Es sind statistische Angaben in Keilschrift auf Tontafeln der Sumerer, die knapp 3000 Jahre vor unserer Zeitrechnung entstanden sind. Sie waren gut zwei Jahrtausende in diesem geografischen Raum bis hin nach Ägypten in Gebrauch. Heute zählen zur beschreibenden Statistik z.B. auch die vielen Millionen Daten, die tagein-tagaus in industriellen Produktionsbetrieben anfallen. Ihre Verarbeitung ist nur noch mit den modernsten elektronischen Mitteln möglich, wie sie vor allem unser gastgebendes Unternehmen entwickelt.

So wichtig beschreibende Statistik damals war und heute noch ist: Sie hat in der Öffentlichkeit nicht durchweg den besten Ruf, weil sie bis zum Geht-nicht-mehr manipulierbar ist und auch oft und gern manipuliert wird. Churchill soll gesagt haben: „Ich glaube nur einer Statistik, die ich selber gefälscht habe.“ Und in der Tat: So mancher von uns liest und hört mit großem Unbehagen statistische Angaben, und das besonders, wenn sie von Politikern stammen. Geradezu staunenswert ist ja, wie jemand es durch geschickte Interpretation fertigbringt, auch mit korrekten Daten allein durch deren Auswahl eindrucksvoll zu lügen. Ich habe beim Zuhören gelegentlich den Eindruck, dass der Redner das köstliche Buch von Darrell Huff „How to lie with statistics“ recht aufmerksam studiert haben muss. Das gilt übrigens auch für (gewiss nicht alle, aber doch für zu viele) Journalisten und andere Meinungsmacher.

1.2.3 Beginn

Die Anfänge der schließenden Statistik sind viel jüngeren Datums. Da sind vor allem zwei französische Mathematiker Mitte des 17. Jahrhunderts zu nennen, Blaise Pascal und Pierre de Fermat. Sie haben der Nachwelt nicht hinterlassen, wie sie darauf gekommen sind, sich mit Fragen der Wahrscheinlichkeit zu beschäftigen. Im Umlauf ist aber eine Erklärung, die viel für sich hat. Sie führt uns an den Hof des Sonnenkönigs Ludwigs des XIV in Versailles. Die einzige Aufgabe der meisten adligen Höflinge dort war es, dem Herrscher auf einen Wink hin jederzeit zu Diensten zu sein.

Doch konnten Stunden, ja Tage vergehen, bis jemand antreten musste. Aus Langeweile vertrieb man sich die Zeit mit Glücksspielen. Wenn nun mitten im Spiel einer aus der Runde zum Dienst befohlen wurde, war das Spiel beendet und musste

abgerechnet werden. Doch wie hätte die Partie zum Schluss gestanden? Wie wahrscheinlich war es, dass dieser oder ein anderer gewonnen hätte, und wenn: wie hoch? Es heißt, man habe die Frage den genannten mathematischen Koryphäen vorgelegt. Ob diese tatsächlich zu brauchbaren Lösungen kamen, ist nicht überliefert, doch sollen sie dadurch zu ihren wegweisenden Arbeiten über die Wahrscheinlichkeit angeregt worden sein.

Wie dem auch sei, ihre Erkenntnisse wird man kaum in den qualitätsmethodischen Kontext bringen können, dem mein Referat gilt. Dazu müssen wir im Geschichtsbuch noch gut ein Jahrhundert weiter blättern. Da stoßen wir wieder auf ein mathematisches Genie, in diesem Fall einen Deutschen, Carl Friedrich Gauß. Als ordentlicher Professor der Mathematik und Astronomie an der Universität Göttingen erhielt er den Auftrag seines Landesherrn, das Königreich Hannover zu vermessen. Mit dieser Aufgabe hat er sich 25 Jahre lang immer wieder beschäftigt. Dabei machte ihm die Ungenauigkeit seiner Geräte zu schaffen. Um die Folgen dieser Ungenauigkeiten in den Griff zu bekommen, begann er über die zufälligen Abweichungen seiner Messwerte von ihren Mittelwerten nachzudenken. Er entwickelte dabei die Methode der kleinsten Quadrate und die Normalverteilung (die sog. Gaußsche Glockenkurve). So reagiert ein Genie auf nicht zu behebbende Unzulänglichkeiten seiner Ausrüstung.

1.2.4 Vor-Moderne

Wissenschaftlich fundierte statistische Methoden zur Lenkung und Prüfung der Produktion haben erst im 2. Weltkrieg auf breiter Basis Eingang in die warenerzeugende Industrie gefunden, und zwar in den USA. Warum nicht zuerst bei uns? Das hat mich immer gewundert. Es hat ja in Europa schon viel früher nicht an Versuchen gefehlt, den Nutzen dieser Verfahren zu verdeutlichen.

Schon bald nach dem 1. Weltkrieg beschäftigte sich der Leiter der Versuchsanstalt der Rheinischen Stahlwerke in Düsseldorf, Dr. Karl Daeves, mit einem wichtigen Problem der Eisenhüttenleute, der Identifizierung der Anteile von Mischkollektiven beim Eisenguss. Ihm gelang die Lösung, als er die Häufigkeitsverteilung der Messwerte einer Charge grafisch darstellte und statistisch auswertete. Er nannte seine Methode „Großzahlforschung“ und veröffentlichte sie im Jahr 1922. Bemerkenswert sind die Schlusssätze dieser über 80 Jahre alten Arbeit (ich zitiere): „Man kann sagen, dass die Wahrscheinlichkeitsrechnung sich in allen Forschungszweigen, die auf Erfahrung beruhen, weitgehend verwenden lässt. Sie ist ein Bindeglied zwischen den Erfahrungen der Praktiker und den Forschungen der Wissenschaft, weil sie die in mühsamer langer Praxis erworbenen Ansichten und Anschauungen, die mehr gefühlsmäßig vorliegen, in verwertbare und reproduzierbare Zahlenwerte umsetzt, die dann in den Formeln der Wissenschaftler zu verall-

gemeinernden Schlüssen und wertvollen Wegweisern für neue Bahnen benutzt werden können.“

Daeves hat mit seinem Mitarbeiter August Beckel im Jahr 1948 einen schmalen Band unter dem Titel „Großzahl-Methodik und Häufigkeits-Analyse“ veröffentlicht. Das Buch ist übrigens hier in Weinheim im Verlag Chemie erschienen. Zwar blieb auch er ein Rufer in der Wüste, doch war der Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh) so beeindruckt, dass er in seinem Stab eine Abteilung Technische Statistik schuf, die sich hauptamtlich mit dem Einsatz mathematisch-statistischer Methoden in der eisenschaffenden Industrie beschäftigte. Ihre Leitung hatte nach Kriegsende ein Mann, der sich um die Einführung statistischer Methoden in die deutsche Industrie große Verdienste erworben hat, der 1954 leider viel zu früh verstorbene Prof. Ulrich Graf. Mit seinem profunden Wissen und seiner immensen didaktischen Begabung, gepaart mit einer begeisternden Rhetorik, hat er die gute Sache sehr gefördert. Ich weiß, wovon ich rede, denn als ich mich bald nach dem Anfang meiner unternehmerischen Tätigkeit für Technische Statistik zu interessieren begann, habe ich sehr beeindruckt an mehreren Seminaren teilgenommen, die er an der Technischen Akademie Wuppertal hielt. Doch so weit sind wir noch nicht.

Es ist hier nicht der Ort, auf Einzelheiten der Ergebnisse der „Großzahlforschung“ von Daeves einzugehen. Doch wir sehen hier die erste praktische Anwendung eines wissenschaftlich fundierten statistischen Prinzips bei der Beurteilung industrieller Erzeugnisse.

In Berlin war Technische Statistik zu der Zeit schon ein Thema geworden. 1917 hatte man bei Siemens mathematisch-statistische Verfahren genutzt, um das wirtschaftliche Problem des ständig wachsenden Bedarfs an Telefonverbindungen über den Gleichzeitigkeitsfaktor der Gespräche im Griff zu behalten. Die Firma Osram bemühte sich mithilfe der Statistik die Risiken zu berechnen, die bei Garantiesprüchen wegen der Frühausfälle von Glühlampen auftraten.

Alles das führte zu einer bemerkenswerten Initiative. An der Technischen Hochschule Berlin wurde im Wintersemester 1928/29 eine Vortragsreihe mit dieser Thematik veranstaltet. Sie blieb aber ohne größere Resonanz in der Industrie, ebenso wie ein zweiter Versuch 1936 mit dem Generalthema „Neues über Wahrscheinlichkeiten und Schwankungen“. Dieses Schicksal teilte auch das 1927 erschienene Werk der Herren Becker und Plaut mit Frau Runge: „Anwendungen der mathematischen Statistik auf Probleme der Massenfabrikation“. Es hat also nicht an fundierten Hinweisen gefehlt, dass mathematische Statistik ein sehr nützliches Hilfsmittel für die Beurteilung industrieller Gegebenheiten sein kann.

Warum hat die Industrie dieses ihr so nachdrücklich empfohlene Hilfsmittel links liegen lassen? Meine Erklärung ist einfach genug. Das Denken in Wahrscheinlichkeiten war den Ingenieuren zu fremd, um sich ernsthaft damit zu beschäftigen. Ich gehe so weit, statt von „zu fremd“ von „zu unheimlich“ zu sprechen. Ingenieure

waren es gewohnt, streng kausal zu denken. Während ihrer gesamten Schulzeit und ihres Studiums hörten sie von Handlungsfolgen im Sinn von: Wenn dies, dann das. Dabei lehrt doch die Erfahrung, dass es in Wirklichkeit in aller Regel heißen muss: Wenn dies, dann wahrscheinlich das, aber vielleicht auch nicht.

1.2.5 Walter Shewhart

Es blieb einem Amerikaner vorbehalten, statistische Verfahren zu erdenken, die für die Industrie auf breiter Front qualitätsrelevant wurden. Das war Walter Shewhart, ein Physiker der Bell Telephone Company. Sein grundlegendes Werk „Economic Control of Quality of Manufactured Product“ erschien 1931, aber seine Erkenntnisse gehen auf das Jahr 1924 zurück. Walter Shewharts Verdienst ist es, in der Industrie das Tor für quantitatives Denken in Wahrscheinlichkeiten geöffnet zu haben. Er selbst hat seine Leistung für das weltweite Qualitätsgeschehen sehr bescheiden kommentiert. Er schreibt:

„The solution required the application of statistical methods which, up to the present time, have been for the most part left undisturbed in the journals in which they appeared.“

Das ist ein klassisches Beispiel für die Richtigkeit eines Satzes des Marketing Gurus Peter Drucker in seinem bekannten Werk „The Age of Discontinuity“. Das Buch ist auf Deutsch im Econ-Verlag unter dem Titel „Die Zukunft bewältigen“ erschienen. Er schreibt in einem ganz allgemeinen Sinn (ich zitiere):

„Ein Großteil der neuen Technik ist nicht neues Wissen, sondern neues Erkennen. Es werden Dinge zusammengesetzt, deren Zusammenstellung zuvor niemandem in den Sinn gekommen ist, die aber längst da waren.“

Wie war Shewhart zu seinen bahnbrechenden Erkenntnissen gekommen? Historiker mögen sich den Kopf darüber zerbrechen, ob er einen Artikel gelesen hat, den Daeves 1924 in der weit verbreiteten US-Zeitschrift Testing unter dem Titel „The Utilization of Statistics“ mit dem Untertitel „A New and Valuable Aid in Industrial Research and the Evaluation of Test Data“ veröffentlicht hat. Manches spricht dafür, doch mehr als eine Anregung könnte es kaum gewesen sein. Shewhart hat sehr selbständig gedacht.

Ich hatte schon vorhin erwähnt, dass Carl Friedrich Gauß die Gesetzmäßigkeit entdeckt hatte, der die zufälligen Abweichungen der Einzelwerte eines Kollektivs von deren Mittelwert folgen. Shewhart übertrug diesen Gedanken auf die Einzelwerte eines laufenden Produktionsprozesses. Dabei beobachtete er immer wieder Abweichungen, die dieser Gesetzmäßigkeit nicht folgten. Er schloss daraus, dass neben den „zufälligen“ Einflüssen auch „überzufällige“, d.h. systematische Einflüsse wirksam sein müssten. Er nannte die einen „chance causes“ und die anderen

„assignable causes“. Erstere muss man hinnehmen, etwa im Rahmen einer Normalverteilung, die letzteren gilt es zu identifizieren und zu beseitigen. Damit erreicht man die geringste Streuung der Werte, die der Prozess unter gegebenen Umständen bieten kann. Das ist der ideal-beherrschte Prozess.

Um diese Unterscheidung machen zu können, trug Shewhart die Mittelwerte und Spannweiten von Stichproben gegebenen kleinen Umfangs aus einer laufenden Fertigung in chronologischer Reihenfolge grafisch in ein Formblatt ein. Das war seine „Control Chart“ (zu Deutsch „Qualitätsregelkarte“).

Aus den Ergebnissen eines Vorlaufs berechnete er Grenzen, innerhalb derer die Messwerte mit gegebener Wahrscheinlichkeit als zufällig streuend betrachtet werden können. Überschreitet ein Prüfwert diese Grenzen, hat diese Annahme eine nur noch sehr geringe Wahrscheinlichkeit für sich. Alles spricht dafür, dass ein überzufälliger Einfluss aufgetreten ist, den man finden und beseitigen muss.

Nun klingt das einfacher, als es in Wirklichkeit ist. Eine Demonstration mit Würfeln, Perlenbüchse und Galtonbrett funktioniert immer. Die Praxis ist in aller Regel bedeutend komplexer. Moderne Computerprogramme, wie sie im Hause Q-DAS[®] entwickelt werden, lassen wesentlich tiefere Einblicke in das Prozessgeschehen zu, als sie Shewhart mit den ihm zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln schaffen konnte: Bleistift, kariertes Papier und eine handbetriebene mechanische Rechenmaschine.

Wir können heute dank der Schnelligkeit unserer Computer Datenvolumina ganz anderer Größenordnung wirtschaftlich verarbeiten. Shewharts Bedeutung wird dadurch nicht geschmälert. Denn heute wie damals ist wichtig, dass die Qualitätsregelkarte bereits den Trend zum Entstehen eines Fehlers in einer laufenden Fertigung erkennen lässt. Das ermöglicht es, rechtzeitig gegenzusteuern, die Aufgabe des Qualitätsmanagements einer Produktion.

1.2.6 Wirtschaftlichkeit

Es ist schlicht und einfach wirtschaftlicher, Fehler vor ihrem Entstehen zu verhüten, als aufgetretene Fehler zu suchen, zu finden und zu korrigieren. Das erfordert einen Zusatzaufwand, dessen Kosten nicht an den Kunden weitergegeben werden können.

Er schmälert also die Gewinnmarge und wird daher richtig mit „Fehlleistungsaufwand“ bezeichnet. Die Qualitätsregelkarte ermöglicht es, mit berechenbarer Wahrscheinlichkeit zu erkennen, wie der Prozess in naher Zukunft laufen wird, d. h. ob es sinnvoll ist, korrigierend einzugreifen oder besser nicht.

Der große kürzlich verstorbene Promotor der Qualitätsoffensive in den USA, Philip Crosby, vergaß nie, seine Zuhörer bei diesem Thema zu ermahnen: „Never forget: It is not what you find. It is what you do about what you find!“

Damit werden sehr zu Recht handfeste Aktivitäten gefordert. Die hat es freilich schon immer gegeben. Fehler waren besonders in Deutschland nie eine mit Achselzucken quittierte quantité négligeable. Das verdanken wir den Gilden und Zünften unserer mittelalterlichen Städte mit ihren geradezu brutalen Sanktionen gegen Pfuscharbeit.

Im Handwerk ist die Tradition von damals im Sinn des Bemühens fehlerfreie Arbeit zu leisten auch ohne einen wissenschaftlichen Unterbau noch spürbar. In der anders gelagerten Industrie war es durchaus wichtig, dass ein anerkanntes Instrument quantitative Hinweise auf das mögliche Entstehen von Fehlern gab, um vorbeugende Aktivitäten auszulösen. Ohne ein solches Instrument bleiben Appelle, fehlerfrei zu arbeiten weitgehend wirkungslos. Viele von Ihnen werden sich noch jener aus den USA zu uns herüber geschwappten Welle der „Zero-Defects“-Kampagnen erinnern. Es war der Versuch, alle Mitarbeiter eines Unternehmens mit z. T. zirkusreifen Motivations-Aktionen zu veranlassen, fehlerfrei zu arbeiten. Sehr bald verlief sich diese Welle im Sand. Immerhin hat sie dazu beigetragen, die existenzielle Wichtigkeit des Faktors Mensch im Qualitätsgeschehen nachhaltig zu unterstreichen.

Seit den Tagen von Daeves und Shewhart hat die Mess- und Regelungstechnik große Fortschritte gemacht. Bei vielen Fertigungen ist es möglich geworden, das Prozessergebnis on-line und on-time quantitativ zu messen und aufgrund dessen in den laufenden Prozess regelnd einzugreifen. Dabei werden wir ebenso unbarmherzig wie nachdrücklich auf das Problem der Fehler gestoßen, die das Messgerät selber verursacht. Auch hierzu hat Q-DAS[®] wichtige Beiträge geleistet.

1.2.7 2. Weltkrieg

Auch die Shewhartsche Qualitätsregelkarte löste in Amerika anfangs keinen Run der Industrie auf Statistik aus. Aber die militärischen Beschaffungsstellen waren von ihrer Wirksamkeit überzeugt. Bei Ausbruch des 2. Weltkriegs sorgten sie mit ihrer enormen Einkaufsmacht dafür, dass die Rüstungsindustrie diese Methoden einführt. Die Rüstungsunternehmen veranlassten wiederum ihre zivilen Zulieferer, sich entsprechend zu verhalten. So wurde die Prozesslenkung mithilfe statistischer Verfahren in den USA zur Methode der Wahl. Nach dem Krieg verbreiteten sie sich auch bei uns, erst zögerlich, aber inzwischen hat man wohl allgemein eingesehen, dass sie – richtig verstanden und eingesetzt – ein sehr effektvolles Instrument der Prozessführung sind.

1.2.8 Stichproben

Und wenn es noch so gut gelungen ist, einen Fertigungsprozess im Sinn der Statistik „fähig“ zu machen, Prüfungen sind und bleiben unverzichtbar, solange Fehler nicht mit absoluter Sicherheit ausgeschlossen werden können. Niemand braucht ein rotglühendes Werkstück auf biologische Kontamination hin zu prüfen. Ansonsten gilt immer noch das berühmte Murphy's Law: „If anything can go wrong, it will“.

Nur in ganz besonderen Fällen wird man die Erzeugnisse einer Losfertigung Stück-für-Stück prüfen. In aller Regel prüft man Lose mit Stichproben. Der Begriff „Stichprobe“ soll ja ursprünglich eine ganz andere Bedeutung gehabt haben. Die Wachen an den Toren unserer mittelalterlichen Städte hatten die Aufgabe, die einfahrenden Waren zu kontrollieren und Zoll zu kassieren. Kam nun ein Wagen hoch beladen mit Heu an das Stadttor, konnte sich unter dem recht billigen Heu kistenweise wertvolle Konterbande verbergen. Um die Homogenität des Heus zu prüfen, stachen die Wachen mit ihren Spießen hinein. Sie machten eine „Stichprobe“ im wahrsten Sinn des Wortes.

Wer bei Qualitätsprüfungen auf Stichprobenbasis ohne eine solide mathematisch-statistische Grundlage zu Werke geht, kann leicht zu falschen Ergebnissen kommen. Das habe ich höchst praktisch als Student im Sommer 1936 im Rahmen eines Ferienjobs erlebt. Ich war im Eingangslager eines Leipziger Unternehmens mit der Prüfung von Zulieferungen beschäftigt. Für jede Warengattung gab es eine Anweisung, wie zu verfahren. Z.B. sollte ich von einer bestimmten Sorte Bolzen jeweils 5% des angelieferten Loses auf Fehlerfreiheit untersuchen. Wenn ich dabei mehr als zwei fehlerhafte Stücke entdeckte, musste das ganze Los Stück für Stück geprüft werden. Ich tat, wie befohlen. Dabei fiel mir auf, dass die so festgestellte Qualität von kleineren Losen in aller Regel besser war als die der größeren, weil die viel häufiger ausgelesen werden mussten. Ich vermutete, dass der Hersteller die kleineren Lose sorgfältiger prüfte als die größeren, wohl, weil er bei diesen den Aufwand scheute. Die Vermutung war falsch. Bei dieser Art Anweisung wächst die Prüfschärfe mit dem Losumfang. Heute gehört die Kenntnis der mathematisch berechneten Operationscharakteristik einer Stichprobenanweisung zur fachlichen Grundausrüstung eines Prüfereileiters, wenn nicht sogar zu der seiner Mitarbeiter. Davon hatte damals weder mein Prüfereileiter noch ich etwas gehört.

Auch hier haben die Amerikaner Pionierarbeit geleistet. Sie verwendeten bei der Annahme von militärspezifischem Gut Stichprobensysteme auf mathematisch-statistischer Basis, nämlich den Military Standard 105 für attributive Prüfung und den Mil St. 414 für Variablenprüfung. Wir erfuhren erst nach dem Krieg von der Existenz dieser Systeme.

Im Jahr 1965 wurde die NATO AC/250-Gruppe geschaffen, die für Qualitätsfragen der wehrspezifischen Beschaffung zuständig war. Sie sorgte dafür, dass diese mathematisch-statistisch sauberen Verfahren in Europa neu codifiziert und für die Lieferungen von Rüstungsgut verbindlich erklärt wurden. In einem bestimmten Maß akzeptierte die Gruppe Verfahren, die in den einzelnen NATO-Ländern bereits auf dieser Basis eingeführt worden waren. In Deutschland waren es die militärische VG 95083 des Bundesamts für Wehrtechnik und Beschaffung und im zivilen Bereich die ASQ/AWF 1. Sie war 1966 von der Arbeitsgemeinschaft Statistische Qualitätskontrolle entwickelt worden, und wurde später zur Norm DIN 40080 aufgewertet.

1.2.9 Von TESTA zur Deutschen Gesellschaft für Qualität

Damit sind wir bei der ASQ, ihrer Vorgängerin TESTA und ihrer Nachfolgerin, der Deutschen Gesellschaft für Qualität (DGQ). Sie hat das Qualitätsgeschehen im gesamten deutschen Sprachraum Europas entscheidend beeinflusst und tut es noch heute. Wir müssen uns jetzt mit ihr, wenn schon in Stichworten, beschäftigen.

Im Rahmen des seit dem ersten Weltkrieg bestehenden Ausschuss für wirtschaftliche Fertigung (AWF) bildete sich im Jahr 1952 eine Arbeitsgruppe, die sich für die Einführung der in den USA entwickelten mathematisch-statistischen Verfahren der Qualitätssicherung und -prüfung einsetzen wollte. Die Gruppe grenzte sich durch ihren Namen TESTA (für Arbeitsgemeinschaft Technische Statistik) von der Aufgabenstellung etwa der Deutschen Statistischen Gesellschaft ab, die an der ihr zunächst angetragenen Thematik kein Interesse gezeigt hatte. Die Aktivitäten der TESTA galten ja auch nicht so sehr der Weiterentwicklung technisch-statistischer Methoden als solcher. Im Mittelpunkt des Interesses stand von Anfang an der Einsatz dieser Methoden zur Qualitätslenkung und -prüfung in der Industrie. Sie sah Statistik als Basis qualitätsrelevanten Denkens und Handelns. Folgerichtig nannte sich die TESTA schon fünf Jahre nach ihrer Gründung „Arbeitsgemeinschaft Statistische Qualitätskontrolle“ (ASQ).

Im Jahr 1968 beschloss die Mitgliederversammlung, in Zukunft den Namen „Deutsche Gesellschaft für Qualität“, kurz DGQ, zu führen. Die Statistik blieb nach wie vor ein wichtiger Programmpunkt, doch hatten daneben inzwischen andere Aspekte des industriellen Qualitätsgeschehens stark an Bedeutung gewonnen, besonders solche der Organisation, der Kosten und der Menschenführung, also des Managements der Qualität. Der neue Name sollte dieser Entwicklung Rechnung tragen. Im Jahr 1972 kam es aus sachlichen und vereinsrechtlichen Gründen zur Trennung von DGQ und AWF. Die DGQ wurde als e. V. rechtlich selbständig und ist es noch heute mit über 8000 persönlichen und korporativen Mitgliedern. Soweit die Historie.

In den 50er-Jahren hatte es ein Interessent für technische Statistik in unserem Land nicht leicht, sich über deren Methoden fundiert zu informieren. Das wollten wir ändern. Ich erinnere mich noch gut an den ersten Kurs in Frankfurt 1954. Ich war damals Vormann der noch kleinen Gruppe von Missionaren dieser Denkweise. In dieser Eigenschaft hatte ich es übernommen, an 4 aufeinander folgenden Wochenenden (Samstagnachmittag mit „open end“ und Sonntagvormittag) zunächst einen Überblick über die Grundlagen der Technischen Statistik zu geben, am folgenden Wochenende die Technik der Qualitätsregelkarten zu behandeln, am dritten die Prüfung von Losen mit Stichproben und am vierten die Auswertverfahren der schließenden Statistik darzustellen. Das Ganze war als erster Versuch gedacht, es lagen ja keinerlei Erfahrungen vor. Wir rechneten mit 15 bis 20 Teilnehmern. Zu unserem Erstaunen lief das Telefon mit Anmeldungen heiß, so dass wir ein anderes Lokal anmieten mussten. Die Veranstaltung mit gut 200 Teilnehmern war ein voller Erfolg. Wir zogen daraus die Konsequenz, dass Aus- und Weiterbildung auf diesem Gebiet gefragt war, und veranstalteten eine Folge aufeinander abgestimmte Lehrgänge. Wer wollte, konnte zum Schluss eine Prüfung ablegen, um den sog. ASQ-Schein zu erhalten. Dieser wurde sehr bald von den Personalabteilungen der Unternehmen als Befähigungsnachweis für Tätigkeiten in den Prüfabteilungen gesehen und anerkannt. Ein sehr guter Grund ihn zu erwerben. Es verwundert daher nicht, dass es geradezu einen Run auf unsere Kurse gab. Statistische Lehrveranstaltungen waren anfangs der einzige, später lange Jahre der wichtigste Umsatzträger der DGQ. Heute sind sie immer noch ein abrundender Teil des inzwischen stark aufgefächerten Angebots an qualitätsbezogenen Kursen, Seminaren und Workshops, an denen jährlich bis zu 30 000 Interessierte teilnehmen.

Wir hatten in der Nische Aus- und Weiterbildung auf dem Gebiet der Technischen Statistik lange Jahre eine Monopolstellung. Aber wir waren nicht traurig, als schließlich auch von der DGQ unabhängige Personen und Organisationen hier ein wirtschaftlich interessantes Arbeitsfeld erkannten. Als gemeinnütziger Verein sahen wir uns in der Pflicht, alle Bemühungen zu fördern, die der Verbreitung unseres Gedankenguts galten.

1.2.10 Denken in Wahrscheinlichkeiten

Bei unserem Bemühen um die Verbesserung der Qualität der Produktion von Waren und Dienstleistungen mit statistischen Instrumenten dürfen wir aber nie übersehen, dass es existenziell-wichtige Voraussetzungen für den erfolgreichen Einsatz dieser Methoden gibt. Beachtet man sie nicht, können einem leicht unangenehme Probleme ins Haus stehen. Wir wollen uns diese Voraussetzungen jetzt ansehen. Sie gelten übrigens für beschreibende wie für schließende Statistik in gleicher Weise.

1.2.11 Herkunft der Ausgangsdaten

Betrachten wir zunächst die Herkunft des Urmaterials. Ich habe mir im Lauf meines Berufslebens zur Regel gemacht, vor einer Entscheidung, die auf Ergebnissen einer Untersuchung von Dritten beruht, mir stets zwei wichtige Fragen zu stellen:

- War die untersuchende Person oder Organisation für die Aufgabe ausreichend qualifiziert? D. h. Sind die Daten richtig oder möglicherweise fehlerhaft?
- Ist auszuschließen, dass die Daten manipuliert, also gefälscht sind, weil die sie liefernde Person oder Organisation ein eigenes Interesse an der Entscheidung hat, die ich treffen muss?

Diese Fragen verstehen sich ohne Kommentar. Sie stellt sich jeder verantwortungsvolle Entscheidungsträger, und das umso sorgfältiger, je bedeutungsvoller die zu treffende Entscheidung ist. Wir brauchen sie hier nicht zu vertiefen.

1.2.12 Statistische Arbeit

Anders steht es mit der statistischen Arbeit. Die Aufbereitung des Urmaterials und die Interpretation des Ergebnisses ist Sache des Statistikers. Wir dürfen sachgerechte Arbeit unterstellen, wenn er kompetent ist. Falls nicht, sind fehlerhafte Aufbereitung und irrige Interpretation mit allen Folgen vorprogrammiert. Der Untersuchende kann z. B. recht leicht auf einen Irrweg geraten, wenn er rein formal vorgeht. Die Gefahr ist bei Ursache/Folge-Problemen besonders groß. Das klassische Beispiel einer rechnerisch hohen Korrelation ist die Sache mit dem Tag und der Nacht, ohne dass der Tag die Ursache der Nacht wäre. Gemeinsame Ursache von beiden ist die Erddrehung. Indirekte Korrelationen dieser Art kommen leicht bei Zeitreihen vor, wenn ein Trend beide Größen beeinflusst. Das ist nicht immer so leicht zu sehen wie bei Tag und Nacht.

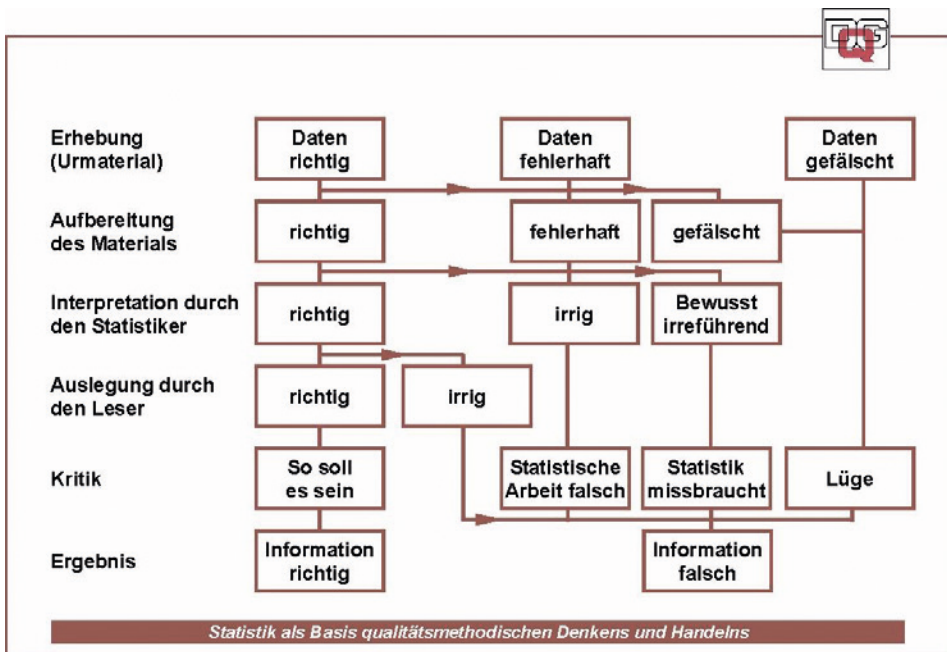
Aber es gibt auch echte Schein-Korrelationen, im Englischen viel treffender „Non-sense Correlations“ genannt. Etwa wenn man liest, dass nach Beobachtungen im Landkreis X die Anzahl der brütenden Storchpaare mit der der Geburten im Kreiskrankenhaus während der letzten zehn Jahre rechnerisch hoch korreliere.

Fehler bei der Aufbereitung des Materials und Irrtümer bei der Interpretation statistisch errechneter Zusammenhänge sind schlimm genug, aber viel schlimmer wird es, wenn der Statistiker eine bewusst irreführende Interpretation vorlegt, weil er oder seine Hintermänner am Ergebnis persönlich interessiert sind. Beispiele dafür sehen wir immer wieder in den Medien, wenn es um Arbeitsmarktdaten oder um Hochrechnungen des Verkehrsaufkommens und der Energieversorgung geht. Das ist schlichtweg Betrug, ein krimineller Akt, der zu entsprechenden Konsequenzen jeden Anlass gibt. Wir wollen hoffen, dass so etwas in unseren Unternehmen nicht vorkommt. Aber Aufmerksamkeit empfiehlt sich immer.

1.2.13 Auslegung durch den Leser

Endlich die Auslegung durch den Leser. Dieser Punkt ist wohl der wichtigste von allen. Es möge um die Entscheidung gehen, ob bei der Fertigung eines neuen Produkts das Verfahren A oder B benutzt werden soll. Weil diese Entscheidung erhebliche wirtschaftliche Konsequenzen hat, sind mit beiden Verfahren Messreihen gemacht worden. Dem entscheidenden Gremium liegt das einwandfrei ausgewertete Ergebnis vor. Der Statistiker beschreibt in seiner Vorlage kurz den Ablauf der Versuche und formuliert dann völlig korrekt das Ergebnis seines t-Tests: „Die Wahrscheinlichkeit beträgt 15 % dafür, dass bei Gültigkeit der 0-Hypothese eine Differenz der Mittelwerte beider Verfahren von 10% oder mehr auftreten kann.“ Ich überlasse es Ihnen, eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit zu machen, dass ein Entscheidungsträger der Wirtschaft dieses Ergebnis der Untersuchung richtig deutet. Vermutlich wird er angesichts der Notwendigkeit eine Entscheidung so oder so zu treffen, seufzend denken: Paralyse durch Analyse! Doch mehr gibt das Material nicht her. Der große englische Statistiker Ronald A. Fisher, dem wir den so wichtigen F-Test verdanken, hat dazu gesagt:

„Ein Statistiker ist kein Alchemist, der aus wertlosem Material Gold machen kann. Er ist eher ein Chemiker, der das Material analysiert. Er kann aber nicht mehr herausholen, als drin ist.“



Folie 23 - 11/03

Bild 1.2 Datenbasis

Die eben geschilderten Gegebenheiten zeigt Bild 1.2 im Zusammenhang. Nur in der ersten Spalte kommen wir zu einer zutreffenden Information als seriöse Grundlage einer Entscheidung. In der zweiten Spalte ist die statistische Arbeit falsch, die dritte zeigt missbrauchte Statistik, die vierte endlich eine mehr oder weniger plumpe Lüge. Alles das verursacht eine falsche Information, die zu einer falschen Entscheidung führt.

1.2.14 Abschluss

Von Albert Einstein stammt das Wort: „Der liebe Gott würfelt nicht.“ So formulierte er seine Überzeugung, dass die Natur letztlich determiniert ist. Ich bin nicht vermessen genug, mir dazu eine gültige Meinung zu bilden. Die Erfahrung eines langen Lebens als Gewinn- und Verlustverantwortlicher eines mittelständischen Industriebetriebs hat mich aber mit aller wünschenswerten Deutlichkeit gelehrt, den Zufall im betrieblichen Geschehen nicht zu unterschätzen. Den Begriff Zufall benutze ich hier im Sinn von „Ursachen im Einzelnen unbekannt“. Sie merken, dass ich es damit vermeide, einem Genie wie Albert Einstein zu widersprechen, ohne meine Position aufgeben zu müssen.

Dass wir dem so definierten Zufall nicht schutzlos ausgeliefert sind, sondern über Methoden verfügen, ihn uns nutzbar zu machen, verdanken wir der statistischen Mathematik, die seit den Herren Pascal und Fermat ständig weiterentwickelt worden ist. In diese Entwicklung hat sich auch das Haus, zu dessen Ehren wir uns heute hier versammelt haben, mit großem Erfolg eingeklinkt. Wünschen wir unseren Gastgebern viele weitere Erfolge, denn sie helfen denen, die mit diesen Methoden arbeiten, Erfolg zu haben. Was könnte befriedigender sein, als sich dafür einzusetzen?

■ 1.3 Anforderungen aus der Normung

Mehrere nationale und internationale Normen fordern den Einsatz und die Verwendung von statistischen Verfahren. Mit den daraus gewonnenen Ergebnissen (insbesondere Kennzahlen) können Geschäftsvorfälle und Abläufe zunächst beurteilt und durch den Vergleich mit Vorgaben (Sollwerte, Grenzen etc.) bewertet werden. Über allem steht dabei die DIN EN ISO 9001:2015, in der die Anforderungen zum Aufbau und Betrieb eines Qualitätsmanagementsystems beschrieben sind (DIN, 2015b). Bei der Überarbeitung zur Ausgabe 2015 wurden leider diverse konkrete Hinweise auf statistische Methoden in die ISO 10017 verlagert, auf die in

Anhang B der Norm verwiesen wird (DIN, 2021a). Dort werden speziell für die Bereiche

- Planung – Maßnahmen zum Umgang mit Risiken und Chancen
- Ressourcen – Ressourcen zur Überwachung und Messung
- Bewertung der Leistung – Überwachung, Messung, Analyse und Bewertung

auf die in ISO 10017 beschriebenen Methoden verwiesen. Eine Konkretisierung der Methoden enthält die ISO 9001 dementsprechend an dieser Stelle nicht.

Die ISO/TR 10017 („Guidance on Statistical Techniques for ISO 9001:2000“) dient als Anleitung zur Auswahl und Anwendung statistischer Methoden, die für die Weiterentwicklung, Aufrechterhaltung und Verbesserung eines Qualitätsmanagementsystems nach DIN EN ISO 9001 geeignet sein können (DIN, 2021a). In der zweiten Auflage dieses Leitfadens ist die neue Struktur der DIN EN ISO 9001:2015 noch nicht berücksichtigt, die Aktualisierung befindet sich zum Zeitpunkt der Drucklegung dieses Buches gerade in Arbeit. Es ist aber anzunehmen, dass sich die Grundzüge wenig ändern. Für alle Abschnitte der Norm werden der Bedarf und die Verwendung quantitativer Daten identifiziert sowie geeignete statistische Methoden aufgeführt. Tabelle 1.2 zeigt diese Zusammenhänge in Form einer Matrix.

Insgesamt nennt die ISO/TR 10017 zwölf Methoden (Tabelle 1.1), die alle kurz erläutert sowie hinsichtlich Randbedingungen, Nutzen und Grenzen der Anwendung näher beschrieben werden.

Tabelle 1.1 Übersicht der statistischen Methoden ISO/TR 10017

Methoden ISO/TR 10017	Inhalt
Deskriptive Statistik	Charakterisierung der Daten mithilfe von statistischen Kennwerten und grafischen Darstellungen
Versuchsplanung	Schlussfolgerungen anhand der Ergebnisse geplanter Experimente auf Grundlage eines bestimmten Vertrauensniveaus
Testverfahren	Überprüfung der Vereinbarkeit der Daten mit definierten Hypothesen bei einem gegebenen Fehlerrisiko
Messsystemanalyse	Bewertung der Fähigkeit/Unsicherheit eines Messsystems unter Anwendungsbedingungen
Prozessfähigkeitsuntersuchung	Untersuchung von Prozessen und deren Ergebnisse hinsichtlich der Erfüllung von Anforderungen/Spezifikationen
Regressionsanalyse	Untersuchung des Einflusses/der Abhängigkeit verschiedenen Faktoren auf das Verhalten von Merkmalen
Zuverlässigkeitsanalyse	Untersuchung der Lebensdauer/fehlerfreien Leistungsdauer eines Produkts oder Systems

Methode ISO/TR 10017	Inhalt
Stichproben-Prüfung	Gewinnung von Informationen über Merkmale einer Grundgesamtheit durch Untersuchung repräsentativer Stichproben
Simulation	Mathematische Beschreibung von Systemen zur Lösung komplexer Probleme
Regelkarten	Bewertung der Prozessstabilität über die Zeit
Statistische Toleranzrechnung	Verfahren zur Toleranzbestimmung
Zeitreihenanalyse	Untersuchung von Verhaltensmustern und Vorhersage zukünftiger Beobachtungen

Tabelle 1.2 Mögliche Zuordnung statistischer Methoden zu Anforderungen der DIN EN ISO 9001:2015 gemäß ISO/TR 10017

Kapitel/Unterkapitel der DIN EN ISO 9001:2015	Statistische Methoden der ISO/TR 10017											
	Deskriptive Statistik	Versuchsplanung	Hypothesentest	Mess- und Prüfprozesseignung	Prozessfähigkeitsanalysen	Regressionsanalysen	Zuverlässigkeitsanalysen	Stichprobennahme	Simulation	Statistische Prozessregelung	Statistische Tolerierung	Zeitreihenanalyse
4. Kontext der Organisation												
4.1 Verstehen der Organisation und ihres Kontextes	x						x		x			x
4.2 Verstehen der Erfordernisse und Erwartungen interessierter Parteien	x						x					x
5. Führung												
5.2.2 Bekanntmachung der Qualitätspolitik	x						x					
6. Planung												
6.1 Maßnahmen zum Umgang mit Risiken und Chancen	x											
7. Unterstützung												
7.1 Ressourcen												
7.1.1 Allgemein	x											
7.1.3 Infrastruktur	x				x		x					

Die ISO/TR 10017 erhebt weder einen Anspruch auf Vollständigkeit noch wird die Anwendung der Methoden vorgeschrieben bzw. werden andere, sinnvolle Methoden ausgeschlossen. Auch handelt es sich nicht um eine verbindliche Checkliste, die zur Erfüllung der Anforderungen der DIN EN ISO 9001 „abgearbeitet“ werden muss. Im Vordergrund steht vielmehr, die Organisation bei der Auswahl und Anwendung statistischer Methoden zu unterstützen und Anregungen für den Einsatz solcher Methoden zu liefern.

Speziell für die Automobilindustrie gelten zusätzlich die Anforderungen aus der IATF 16949:2016 (IATF, 2016). Bezüglich der statistischen Verfahren wird dabei insbesondere auf die Eignungsnachweise von Messsystemen MSA (Measurement System Analysis, A.I.A.G., 2010) (Abschnitt 1.5) und die kontinuierliche Prozessüberwachung gemäß SPC (Statistical Process Control, A.I.A.G., 2005) (Abschnitt 1.6), die wesentlich zur Verbreitung dieser Verfahren beigetragen hat.

■ 1.4 Internationale Normung von statistischen Verfahren

Sowohl nationale als auch internationale Gremien und Ausschüsse beschäftigen sich mit der Standardisierung von statistischen Verfahren, um diese in Normen zu spezifizieren. Für Deutschland ist dies im DIN (Deutsches Institut für Normung e. V.) der Normungsausschuss NA 147 (NQSZ: Normung Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen). Dabei beschäftigt sich der Unterausschuss 02 mit der angewandten Statistik. Das dazu gehörige Spiegelgremium auf internationaler Ebene ist in der ISO (International Organization for Standardization) das Task Committee TC 69 (Application of Statistical Methods).

Alle im ISO TC 69 bearbeiteten Normen sind in dem Technical Report ISO/TR 13425 Guidelines for the Selection of Statistical Methods in Standardization and Specification (Leitfaden zur Auswahl standardisierter statistischer Verfahren) übersichtsartig zusammengefasst (Bild 1.3). In diesem Dokument ist jede Norm kurz beschrieben und deren Anwendung erläutert (DIN, 2006b).

In der DIN ISO 3534 ff. sind statistische Begriffe definiert und erläutert (DIN, 2006a; DIN, 2019).

Der Technical Report ISO/TR 18532 (Guide to the Application of Statistical Methods to Quality and Standardization – Leitfaden zur Anwendung statistischer Methoden zur Qualität und Standardisierung) beschreibt viele statistische Verfahren sehr detailliert und kann zum Grundlagenstudium herangezogen werden (ISO, 2009).

Speziell für den Bereich Messtechnik und Eignungsnachweis von Prüfprozessen sei auf das VIM (Internationales Wörterbuch der Metrologie (VIM) – International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms), in dem messtechnische Begriffe erläutert sind, und der GUM (Guide to the expression of uncertainty in measurement – Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen), in der die Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit beschrieben ist, verwiesen (DIN, 1999; DIN, 2007).

Leider wurden sowohl in der nationalen als auch internationalen Normung die Themen „Statistische Prozessregelung“ und „Eignungsnachweise von Prüfprozessen“ zunächst nur sehr stiefmütterlich behandelt, sonst wären wahrscheinlich Leitfäden wie SPC (A.I.A.G., 2005) oder MSA (A.I.A.G., 2010) nicht entstanden. Aufgrund fehlender geeigneter Normen hat sich die Automobilindustrie selbst geholfen und diese Leitfäden entwickelt. Erste Richtlinien zu diesen Themen entstanden bereits Mitte der 80er-Jahre, vornehmlich in den USA, die sich durch Globalisierung mittlerweile weltweit verbreitet haben.

Ähnliches trifft für den Themenbereich Six Sigma (s. Abschnitt 1.8) zu. Erst mit mehrjähriger Verzögerung wurden auch für diese Thematik Normen entwickelt (ISO 13053-1:2011-09), (ISO 13053-2:2011-09).

Die Normung auf internationaler Ebene ist aufgrund der unterschiedlichen Interessenlage der beteiligten Nationen sehr schwierig und zeitraubend. Daher können leicht von der Idee, eine Norm anzugehen, bis zu der endgültigen Freigabe fünf oder mehr Jahre vergehen.

ISO/TR 13425:2006(E)

2 Cartography

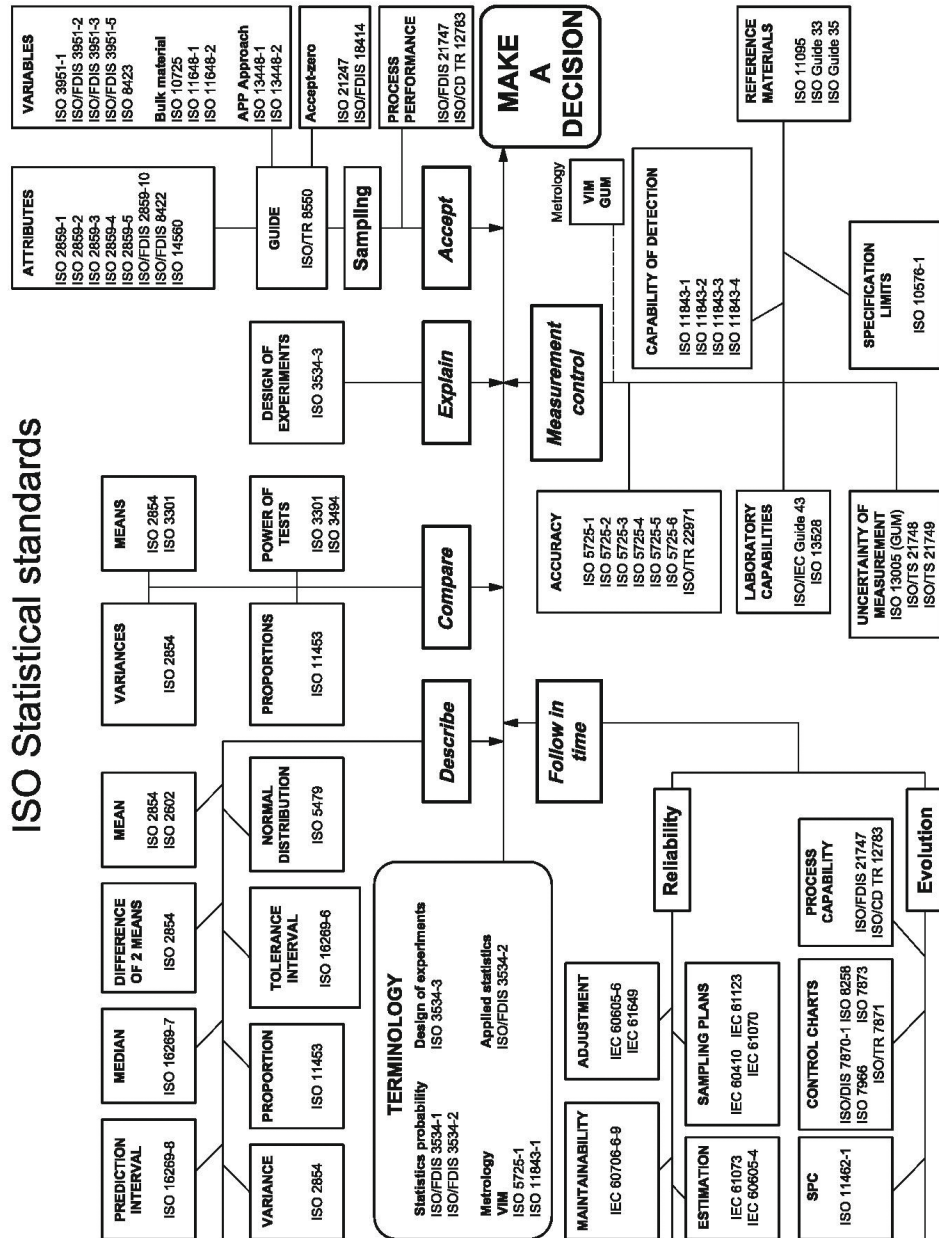


Bild 1.3 Übersicht Statistischer Normen aus ISO/TR 13425:2006 (E) (DIN, 2006b)

■ 1.5 Eignungsnachweis von Messprozessen

Die Grundlagen jeder statistischen Auswertung sind Mess- oder Prüfergebnisse, unabhängig, ob diese von quantitativen oder nicht quantitativen Mess- und Prüfprozessen stammen. Jede statistische Auswertung wird ad absurdum geführt, wenn die Datenbasis fehlerhaft ist. Daher wird in mehreren Normen (insbesondere in der DIN EN ISO 10012 – Messmanagementsysteme (DIN, 2004) und DIN ISO 22514-7 (DIN, 2021b) der Eignungsnachweis von Prüfprozessen gefordert.

Historisch bedingt wurden insbesondere in der Automobilindustrie statistische Verfahren zur Beurteilung von Messsystemen vorangetrieben. Grundlage und Basis ist heute nach wie vor die vierte Ausgabe des Leitfadens MSA (Measurement System Analysis) (A.I.A.G., 2010). Dieser beschreibt kochrezeptartig, wie ein Messsystem bewertet werden kann. Dazu wird im Wesentlichen der sogenannte %GRR (Gage Repeatability and Reproducibility – Messmittel Wiederholbarkeit und Vergleichspräzision) ermittelt. Dieser errechnete Wert wird mit vorgegebenen Grenzwerten verglichen. Je nach Ergebnis wird das Messsystem mit „Geeignet“, „Bedingt geeignet“, „Nicht geeignet“ bewertet. Diese Vorgehensweise ist aufgrund ihrer Einfachheit heute sehr weit verbreitet.

Im Umfeld der internationalen Normierung beschäftigt sich der GUM (Guide to the expression of uncertainty in measurement, ISO/IEC Guide 98-3) (DIN, 1999) mit dieser Problematik. Ermittelt wird dabei die sogenannte erweiterte Messunsicherheit, die der jeweiligen Messung zugeordnet werden kann. Ist diese bekannt, ergibt sich das vollständige Messergebnis (y) aus dem angezeigten Messwert (x) erweitert um die Messunsicherheit U ($y = x \pm U$). Diese Vorgehensweise ist mathematisch anspruchsvoll und lässt sich an vielen Stellen nur sehr aufwendig auf Serienmessprozesse übertragen. Daher hat diese Vorgehensweise in erster Linie bei Kalibrierlaboratorien ihre Bedeutung gewonnen, die akkreditiert werden wollen. Allerdings wird die Verwendung dieser Methodik in der industriellen Produktion immer mehr gefordert, da sie wesentlich genauere und exaktere Ergebnisse im Verhältnis zu den MSA Studien liefert.

Der Verband der Automobilindustrie hat in seinem Band 5 Mess- und Prüfprozesse (VDA, 2021) eine vereinfachte Methodik basierend auf dem GUM angewandt. Die darin beschriebene Vorgehensweise ist branchenübergreifend auch in der DIN ISO 22514-7 (DIN, 2021b) enthalten.

Neben der Forderung, dass Messprozesse einen Sachverhalt ausreichend genau beschreiben, ist bei der Erfassung und Speicherung eines Messergebnisses großen Wert auf die dem Messwert zugeordnete beschreibende Information (Datum, Uhrzeit, Messmittel, Maschine, Prozessparameter usw.) zu legen. Denn nur so können Messwerte für spätere Auswertungen wiedergefunden werden und Sachverhalte

ganzheitlich betrachtet werden. Werden nicht nur quantitative Merkmale, sondern auch qualitative Merkmale herangezogen, spricht man von einem Prüfprozess. Für diesen müssen ebenfalls Eignungsnachweise durchgeführt werden. Hierfür gibt es bis heute noch relativ wenige brauchbare Verfahren. Eine sehr gute Übersicht findet sich im VDA Band 5 „Mess- und Prüfprozesse“ (VDA Band 5 (2021)).

Näheres zu diesem Thema finden Sie in dem Buch der Autoren „Eignungsnachweis von Prüfprozessen“ (Dietrich, Schulze, 2017).

■ 1.6 Statistical Process Control

SPC steht für statistische Prozessregelung und gilt als ein Element zum „Never Ending Improvement“, bzw. dem „Continual Improvement“, wie das Prinzip der ständigen Qualitätsverbesserung in der ISO 9001:2015 genannt wird.

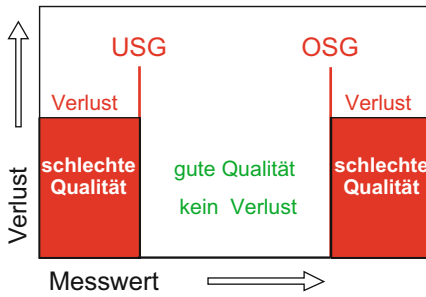
Die ursprüngliche Definition, Qualität als Einhaltung der Grenzwerte zu verstehen, bietet kaum Anreiz zur ständigen Verbesserung der Produktqualität. Solange sich die erzeugten Produkte innerhalb der durch die Zeichnung vorgegebenen Toleranzen bewegen, wird auf der Grundlage dieser Theorie niemand bestrebt sein, über eine Verbesserung dieses Prozesses nachzudenken.

Alle Beteiligten in einem Prozess müssen jedoch dazu beitragen, durch den Einsatz von technisch realisierbaren und wirtschaftlich vertretbaren Anstrengungen ein Produkt zu erzeugen, das mit möglichst geringer Streuung den angestrebten Zielwert erreicht. Die Notwendigkeit für ein solches Handeln ist durch den immer stärker ausgeprägten Kundenwunsch nach qualitativ hochwertigen Erzeugnissen gegeben. Die Bereitschaft entsprechend zu handeln, also bestrebt zu sein, „es so gut wie möglich zu machen“, muss im Denken und im Qualitätsverständnis aller an der Herstellung von Produkten beteiligten Mitarbeiter verankert sein.

Die nachfolgende Erklärung macht die Zusammenhänge deutlich und unterstreicht die Notwendigkeit, in einem modernen und qualitätsorientierten Unternehmen nach dem Prinzip der „ständigen Qualitätsverbesserung“ zu handeln.

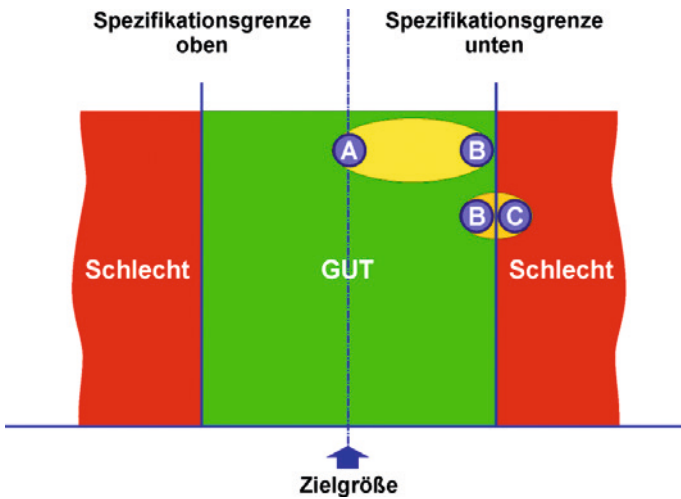
Zunächst wird durch ein Modell die ursprüngliche Auffassung von Qualität verdeutlicht. Alle Produkte, die innerhalb der Toleranzgrenzen lagen, wurden als gut bezeichnet (s. Bild 1.4).

Hierbei wurde kein Unterschied gemacht zwischen einem Teil, das mit seinem Ist-Wert genau in der Mitte der Toleranz lag, oder einem Teil, das mit seinem Ist-Wert an der gerade noch als gut zu bezeichnenden inneren Seite der Toleranzgrenze lag. Entsprechend dieser Definition wurden beide Teile als gut bezeichnet. In Bezug auf den Verwendungszweck ist diese Entscheidung jedoch äußerst fragwürdig.

**Bild 1.4**

Gut-Schlecht-Denken (OSG/USG Obere/untere Spezifikations-Grenze)

Vergleicht man ein Teil knapp außerhalb der Toleranz mit einem Teil gerade noch innerhalb der Toleranz, ist schwer zu verstehen, weshalb ein Teil für den vorgesehenen Verwendungszweck als uneingeschränkt geeignet und das andere Teil als gänzlich unbrauchbar eingestuft wird (Bild 1.5). Diese beiden Teile B und C, die mit ihren Ist-Werten nur geringfügig voneinander entfernt liegen, können in Bezug auf die Einstufung ihrer Verwendungsfähigkeit doch keineswegs derartig große Unterschiede aufweisen, wie uns das durch die konventionelle Betrachtungsweise dargestellt wird.

**Bild 1.5** Beurteilung an der Spezifikationsgrenze

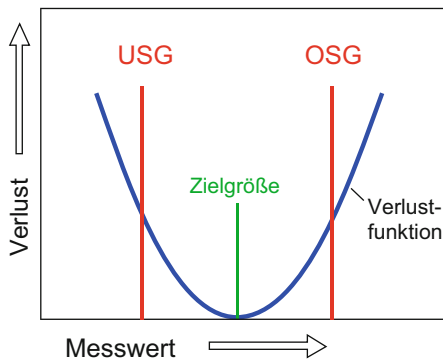


Bild 1.6
Verlustfunktion nach Taguchi

Um ein genaues Bild der Qualitätsleistung eines bestimmten Produktes zu erhalten, dient ein Modell, das die Qualitätsbeeinträchtigung besser beschreibt, die durch Abweichung vom Zielwert verursacht wird. Ein ideales Modell zur Beschreibung dieses Sachverhaltes ist das Modell der Verlustfunktion. Besonders wichtig zum Modellverständnis ist die Erkenntnis, dass Verlust bzw. Qualitätsbeeinträchtigung über den gesamten Anwendungsbereich beschrieben wird. Taguchi hat diesen Verlust sehr treffend als Verlust für die Gesellschaft beschrieben und bringt damit zum Ausdruck, dass man möglichst versuchen sollte, alle beeinflussenden Faktoren, die zur Qualitätsminderung beitragen, für dieses Modell zu berücksichtigen. Nach seinem Modell ist Verlust eine kontinuierliche Größe (s. Bild 1.6) mit einem Minimum bei dem sogenannten Zielwert. Dieser Zielwert ist ein von der Funktion eines Produktes abhängiger Wert, der dem Optimum der Kundenerwartung entspricht und bei korrekter Planung und Auslegung dem Soll-Wert bzw. dem Nominalwert der Spezifikation entspricht. Je mehr nun ein Produkt oder Produktmerkmal von seiner Zielgröße abweicht, desto größer ist der durch diese Abweichung verursachte Verlust.

In dem angesprochenen Modell lässt sich diese Abhängigkeit durch eine Parabel darstellen, die ihr Minimum bei der Zielgröße erreicht. Anhand dieses Modells lässt sich nun sehr anschaulich zeigen, wie wichtig es ist, die Fertigung auf den Nominalwert auszurichten, um somit den Verlust auf ein Minimum zu beschränken. Überlagert man die Verlustfunktion mit der Wahrscheinlichkeitsfunktion der Normalverteilung, wird sofort deutlich, dass ein Prozess mit normalverteilten Produktionsteilen produziert, einen wesentlich geringeren Verlust aufweist als ein Prozess, der die vorgeschriebenen Grenzwerte der Spezifikation noch soeben durch eine Rechteckverteilung erfüllt (Bild 1.7 und Bild 1.8). Nutzt man dieses Modell weiter, so kann verdeutlicht werden, wie eine Reduzierung der Streuung dazu beiträgt den Verlust zu vermindern. Man erkennt auch, wie wichtig es ist, nicht nur die Prozessstreuung zu betrachten, sondern ein gleich großes Interesse darauf zu richten, den Mittelwert (also die Zielgröße) selbst dann anzustreben, wenn die Prozessstreuung nur noch einen kleinen Teil der zugestandenen Gesamt-

toleranz ausnutzt. Ganz sicher lässt sich an diese Modellbetrachtung eine Diskussion anknüpfen, inwieweit die hier benutzten Schaubilder eine exakte Beschreibung darstellen und für jeden Fertigungsprozess uneingeschränkte Gültigkeit besitzen.

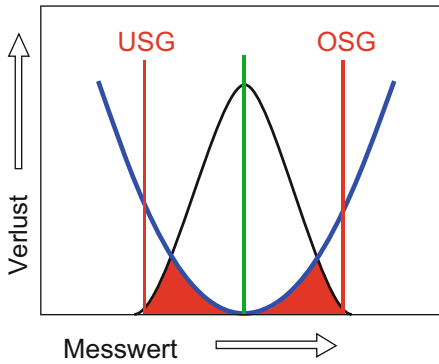


Bild 1.7

Verlust in Abhängigkeit von Prozesslage und -streuung

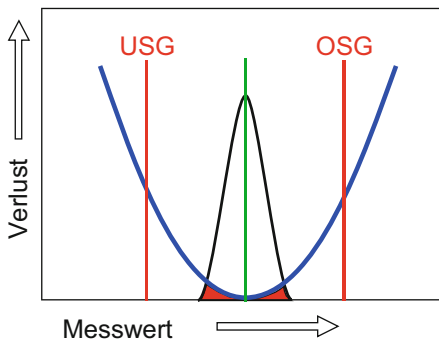


Bild 1.8

Kleinere Streuung minimiert den Verlust

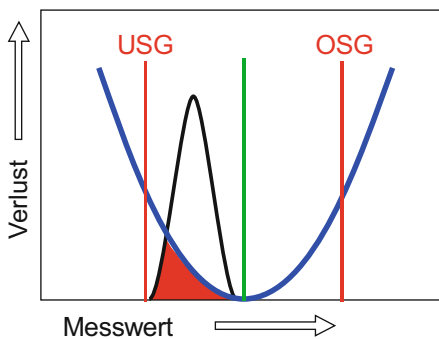


Bild 1.9

Verlust infolge geänderter Prozesslage

Einzig und allein wichtig ist jedoch, zu erkennen, dass ein ausschließlich an der Spezifikation orientiertes Denken und Handeln niemals dem Konzept des ständigen Strebens nach Qualitätsverbesserung gerecht werden kann.

Basierend auf dieser Überlegung muss sich die Vorgehensweise in der Fertigung ändern, sowohl bei der Auslegung von Prozessen als auch beim späteren Betrieb der Einrichtungen. Um im harten industriellen Wettbewerb zu bestehen ist es zwingend notwendig dem Kundenwunsch nach optimaler Qualität gerecht zu werden. Es reicht nicht, Produkte anzubieten, die unter Ausnutzung der gesamten Toleranz hergestellt werden. Alle in einen Prozess eingebundenen Mitarbeiter müssen mit den ihnen zur Verfügung stehenden Möglichkeiten dazu beitragen, den Prozess auf den Zielwert (Nominalwert) (s. Bild 1.9) auszurichten. Gleichzeitig ist anzustreben, die Streuung so gering wie möglich zu halten und gemessen an wirtschaftlich sinnvollen Bedingungen, ständig zu reduzieren.

Bild 1.9 und Bild 1.10 verdeutlichen, dass ein Prozess, der bei der Erzeugung des Produktes die gesamte Toleranz ausnutzt, schlechtere Qualität liefert als ein Prozess, der nach dem Prinzip einer zielwertorientierten Einstellung betrieben wird. Allerdings muss zur Bewertung das Verteilungsmodell, in Bild 1.11 vereinfacht die Normalverteilung dargestellt, bekannt und mathematisch korrekt beschrieben sein. Trifft das nicht zu, sind die darauf basierend berechneten Kennzahlen falsch, was konsequenterweise zu Ungereimtheiten und Fehlinterpretationen führt. Da diese Forderungen bei der Einführung von SPC anfangs nicht ausreichend berücksichtigt wurden, ist SPC schnell in Verruf gekommen und oft als „Show Program for Customers“ bezeichnet worden.

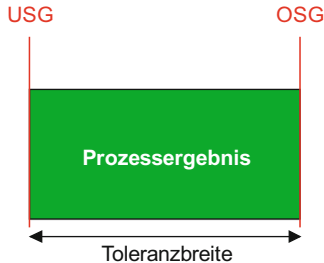


Bild 1.10

Ausnutzung der gesamten Toleranz

Es ist wichtig, zu verstehen, dass die Qualitätsauffassung „Die Toleranz gehört der Fertigung“ nicht mehr in unsere heutige Zeit passt.

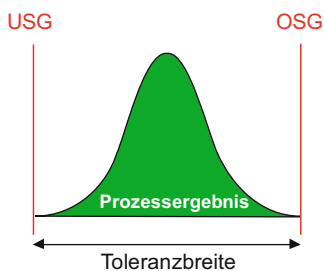


Bild 1.11

Zielwertorientierte Ausnutzung der Toleranz

Das Verständnis von Qualität muss für jeden mit dem Motto: „Nur ständiges Streben nach der Zielgröße gewährleistet ein hohes Maß an Kundenzufriedenheit“ verbunden sein.

■ 1.7 DoE – Design of Experiments

Unter DoE versteht man eine strukturierte Anwendung von bekannten mathematisch-statistischen Verfahren mit dem Ziel: „Prozesse zu optimieren“. Dazu müssen die Zusammenhänge zwischen den auf Prozesse wirkenden Einflussfaktoren und der bzw. den Zielgrößen bekannt sein. Mit diesen Erkenntnissen können die Einflussgrößen eingestellt werden, um Prozesse zu optimieren und zusätzlich robust zu gestalten.

Sir Ronald A. Fisher hat vor fast 100 Jahren erstmals über DoE publiziert. Er schrieb: „Design of Experiments is a structured, organized method that is used to determine the relationship between the different factors (Xs) affecting a process and the output of that process (Y).“

Soweit zur Theorie. Damit erweckte DoE schon häufig den Anschein, dass es in der industriellen Praxis für die unterschiedlichsten Problemstellungen jeweils einen strukturiert vorgegebenen Weg gibt, um mit möglichst wenigen Versuchen einen maximalen Informationsgewinn zu erreichen.

In der experimentellen Physik ist es seit Jahrhunderten üblich, Versuche durchzuführen, um Zusammenhänge zu erkennen und mathematisch zu beschreiben. Eines der ersten und berühmtesten Beispiele geht auf Galileo Galilei (1564 – 1642) zurück, der mithilfe einer Versuchsanordnung der schiefen Ebene mit Kugeln aus verschiedenen Materialien das Fallgesetz untersuchte und damit die „Beschleunigung“ entdeckte. Hier ist es relativ einfach, da ausreichend viele Versuche durchgeführt werden können, um ein mathematisch-physikalisches Modell zu bestätigen.

In der industriellen Produktion tut und tut man sich heute noch schwer mit der Anwendung und Durchführung von Versuchen. Die Gründe hierfür sind vielfältig:

- viele, zum Teil unbekannte Einflussfaktoren bei Fertigungs- bzw. Produktionsprozessen
- der funktionale Zusammenhang zwischen Einfluss- und Zielgrößen ist nicht vollständig bekannt und insofern auch nicht mathematisch modellhaft formulierbar
- konsequenterweise kann der daraus abgeleitete Versuchsplan nicht alle Gegebenheiten abdecken
- die Durchführung der Versuche ist häufig sehr kosten- und zeitintensiv
- die anzuwendenden Verfahren sind statistisch und mathematisch anspruchsvoll und für den Laien nur bedingt nachvollziehbar
- preiswerte Softwareunterstützung für das Finden geeigneter Versuche sowie die Datenanalyse waren in der Vergangenheit nicht vorhanden
- usw.

Damit war die Anwendung von Design of Experiments häufig Spezialisten vorbehalten, die Versuche unter Laborbedingungen, aber selten unter Produktionsbedingungen durchführen konnten.

Auch gibt es zum Thema DoE keinen Leitfaden wie zu SPC (Statistical Process Control) oder FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). In den 80er-Jahren waren Taguchi und Shainin in USA sehr aktiv und haben ihre Methoden zur Prozessoptimierung propagiert. Auch in Deutschland wurden insbesondere die Verfahren von DoE konträr diskutiert. Auf der einen Seite standen die Verfechter der vollständigen faktoriellen Versuchsplanung, auf der anderen Seite diejenigen, die in der Taguchi-Versuchsmethodik ihre Vorteile sahen. Hinzu kamen die Shainin-Methoden, um mithilfe von Streuungsanalysen die Planung von Versuchen zu erleichtern. Was in der Theorie und den vorgestellten Fallbeispielen einfach schien, ließ sich in der Praxis aus den oben genannten Gründen oftmals nur schwer bis gar nicht umsetzen. Viele mit hohem Aufwand durchgeführte Versuche brachten oft nicht den gewünschten Erfolg. Damit schwand das Vertrauen in diese Vorgehensweise. So zeigte beispielsweise am 28. November 1991 beim Q-DAS[®]-Forum (Dietrich, Schulze, 1991) in Frankfurt ein Referent anhand eines Fallbeispiels solche Widersprüche auf:

Am Beispiel der Optimierung des Spaltes zwischen Türblatt und Rahmen mit einem Taguchi-Versuchsplan. Untersucht wurde die Wirkung der Einflussgrößen „Tür“, „Türrahmen“ und „Türfarbe“ auf die Zielgröße „Dichtheit“. Aufgrund der Vermengung von Effekten entstand bei diesem teilfaktoriellen Versuchsplan das praktisch unsinnige Ergebnis: „Die Tür ist schwarz zu streichen“.

Auch aus theoretischer Sicht gibt es bekannte Schwächen: Zum einen sind die verwendeten Modelle oft sehr einfach, nämlich Polynome ersten und zweiten Grades. Mit solchen Modellen kann eine tatsächlich nichtlineare Beziehung zwischen Einfluss- und Zielgrößen in der Regel nur sehr grob angenähert werden. Zum anderen können die mit einem teilfaktoriellen Versuchsplan berechneten Effekte, also die Wirkungen von Einflussgrößen auf die Zielgröße, durchaus falsche Werte haben. Vermengung bedeutet, dass der berechnete Wert für einen Effekt durch Summenbildung aus mehreren Effekten entstanden ist und damit nicht mehr die tatsächliche Wirkung der Einflussgröße repräsentiert.

Neuen Aufschwung erhielt DoE, als das Thema Six Sigma (s. Abschnitt 1.8) verstärkt aufkam. Bestandteil von Six Sigma Trainings und Projekten sind auch die Methoden und Verfahren aus dem Bereich DoE. Hinzu kommt, dass heute Softwarepakete zur Verfügung stehen, die den Anwender bei der Nutzung dieser Verfahren unterstützen. Dies gilt sowohl für die Planungsphase, also dem Entwurf des zu verwendenden Versuchsplans, als auch für die Auswerteverfahren (Tests, Regressions- und Varianzanalysen). Dadurch vereinfacht sich die Anwendung von DoE, was zur Verbreitung im praktischen Einsatz beigetragen hat.

■ 1.8 Six Sigma

1.8.1 Entwicklung der Methode Six Sigma

Die Methode Six Sigma wurde bei Motorola in den Jahren 1979–1985 entwickelt. Allgemeine Beachtung fand die Methode in den USA, als 1997 im Wall Street Journal über die erfolgreiche Kostensenkung durch die Einführung von Six Sigma bei General Electrics berichtet wurde. Seitdem haben viele Firmen in den USA diese Methode mit erstaunlichem Erfolg angewandt. Zurzeit ist zu beobachten, dass Six Sigma auch in Europa immer häufiger in bestehende Verbesserungsprogramme integriert wird.

1.8.2 Was ist Six Sigma?

Six Sigma ist als eine unternehmensweite Initiative zur kontinuierlichen Verbesserung zu verstehen. Es ist ein System, das unternehmensweit angewandt, zu erstaunlichen Verbesserungen in allen operativen Bereichen führen kann. Six Sigma ist

- ein Symbol für die Streuung
- ein anspruchsvolles Ziel
- ein Mittel zur Umsetzung der Unternehmensphilosophie und -werthaltung
- eine universelle Messgröße für die Leistungsfähigkeit von Prozessen
- eine Methode für die kontinuierliche Verbesserung von Prozessen
- eine strukturierte Anwendung von Methoden bei der Problemlösung
- Projektarbeit.

Gerade der letzte Punkt ist von besonderer Bedeutung: Six Sigma ist ein dauerhaft betriebenes Verbesserungsprogramm, das von Projekt zu Projekt führt. Um die angestrebten Verbesserungen zu erreichen, führen professionell ausgebildete Teamleiter die Projekte. Sie sind die Wissensträger der Six Sigma Problemlösungsmethode und der statistischen Methoden, wie sie für die Beseitigung von tiefer liegenden Problemursachen erforderlich sind.

Six Sigma – Ein Symbol für die Streuung und ein anspruchsvolles Ziel

Die Prozessbetrachtungen bei Six Sigma sind immer auf das Modell der Normalverteilung bezogen. Im Unterschied zu den im Buch vorgestellten Verfahren beschränken sich die Prozessbetrachtungen bei Six Sigma ausschließlich auf dieses zeitabhängige Verteilungsmodell. Davon ausgehend wird nur zwischen einem

„Idealisierten Kurzzeitstatus“ eines Prozesses und einem „Dynamischen Langzeitverhalten“ eines Prozesses unterschieden.

Idealisierter Kurzzeitstatus eines Prozesses

Six Sigma bezeichnet die Fähigkeit eines Prozesses, Merkmale mit $\pm 6\sigma$ innerhalb der Toleranz (s. Bild 1.12) zu erzeugen. Dies entspricht einem Fehleranteil von $p = 0,002$ ppm.

Diese Forderung kann man selbstverständlich nicht auf alle Merkmale anwenden, sondern nur für besondere Merkmale (das sind z.B. kritische Merkmale aus der Sicht des Kunden). Man ist sich dennoch bewusst, dass die Situation $\pm 6\sigma$ innerhalb der Toleranz eine idealisierte Vorstellung ist (entspricht zeitabhängigem Verteilungsmodell A1 (DIN, 2019), s. Kapitel 9). Über einen langen Zeitraum gesehen treten Prozessschwankungen auf. Dies sind Veränderungen in der Lage und der Streuung über die Zeit, verursacht durch die 5M (Mensch, Maschine, Mitwelt, Methode, Messsystem). Dies führte zu dem Ansatz des dynamischen Langzeitverhaltens eines Prozesses.

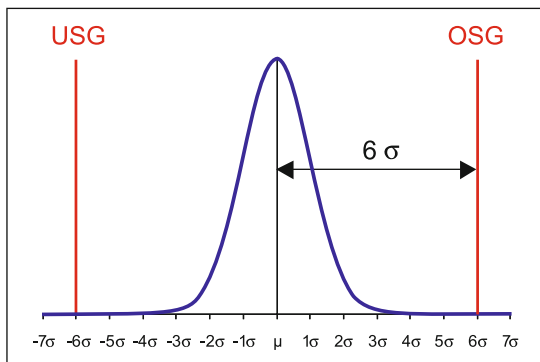


Bild 1.12

Idealisierter Six Sigma-Prozess

Dynamisches Langzeitverhalten eines Prozesses

Als Erfahrungswert für eine mittlere Prozesslageverschiebung werden $\pm 1,5\sigma$ angegeben. Die Situation ist in der folgenden Abbildung dargestellt und bezieht sich auf das Verhalten eines Prozesses über lange Zeit gesehen. Mit diesem Modell wird versucht, alle anderen zeitabhängigen Verteilungsmodelle gemäß (DIN, 2019) abzubilden. Entsprechende Ungenauigkeiten sind damit vorprogrammiert.

Verschiebt man die Prozesslage um $1,5\sigma$ nach rechts, so ergibt sich der Schnittpunkt mit der Toleranzgrenze OSG bei $4,5\sigma$, was einem Fehleranteil von $p = 3,4$ ppm entspricht und immer noch ein hoher Anspruch an die Prozessleistung ist.

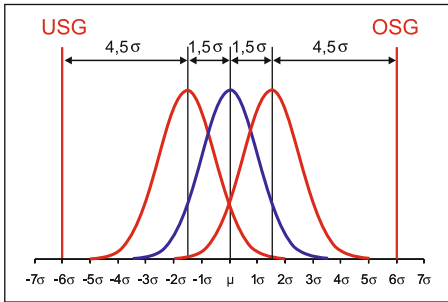


Bild 1.13
Dynamischer Prozess mit $\pm 1,5\sigma$ Lageverschiebung

Obwohl der Fehleranteil für $4,5\sigma$ berechnet wurde, wird von 6σ gesprochen. Diese Vorgehensweise in den Veröffentlichungen zum Thema Six Sigma hat viel zur Verwirrung derjenigen beigetragen, die nicht zu den „Eingeweihten“ zählen.

In der folgenden Tabelle ist zusammengefasst, was mit der Aussage $n\sigma$ gemeint ist. Spricht man z.B. von 3σ , wird der Gutanteil für $(3-1,5)\sigma$ berechnet, weil die Mittelwertverschiebung von $1,5\sigma$ stillschweigend berücksichtigt wird.

Tabelle 1.3 Gutanteil bei einer Lageverschiebung von $1,5\sigma$

$n \cdot \sigma \rightarrow (n - 1,5) \sigma$ (mit Versatz)	Gutanteil
$2 \rightarrow 0,5$	69,14%
$3 \rightarrow 1,5$	93,319%
$4 \rightarrow 2,5$	99,379%
$5 \rightarrow 3,5$	99,977%
$6 \rightarrow 4,5$	99,9997%

Die Sigma-Metrik lässt sich sowohl auf Produktionsprozesse als auch auf Dienstleistungsprozesse anwenden. Für jeden Prozess lässt sich durch eine Prozessstudie der Fehleranteil in Prozent bestimmen. Aus der inversen Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung wird das Quantil bestimmt, dass zu diesem Fehleranteil passt. Dieses Quantil ist der gesuchte Wert **Sigma** des Prozesses.

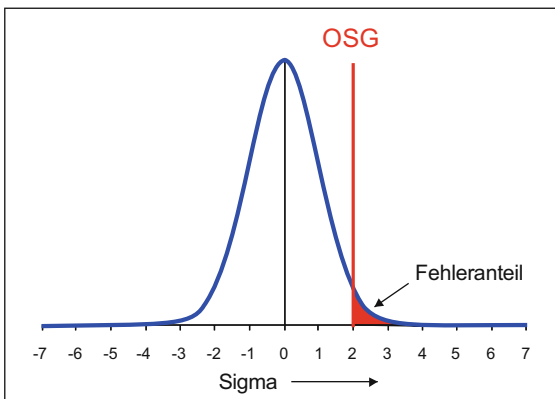


Bild 1.14
Bestimmung von Sigma aus dem Fehleranteil

Gerade die universelle Anwendbarkeit der Sigma-Metrik auf jeden beliebigen Prozess ist eine Eigenschaft, wodurch der Vergleich von Prozessleistungen zwischen Abteilungen, Werken und Standorten auf einfache Weise möglich ist.

Als Ziel ist Six Sigma nur langfristig erreichbar. Prozessverbesserungen von einem Sigma pro Jahr werden als realistisch angesehen. Je näher man dem Zielwert kommt, umso schwieriger sind weitere Verbesserungen zu erreichen. Als eine kritische Grenze hat sich das Niveau von $4,5\sigma$ erwiesen: Dieses Niveau lässt sich mit den bestehenden Produkten, Maschinen und Verfahren erreichen. Weitere Verbesserungen sind oftmals nur dann möglich, wenn in neue Anlagen und Ausstattungen investiert wird und die Produkte prozessfreundlich neu entwickelt werden. Diese langfristige Strategie ist in der folgenden Abbildung zu erkennen.

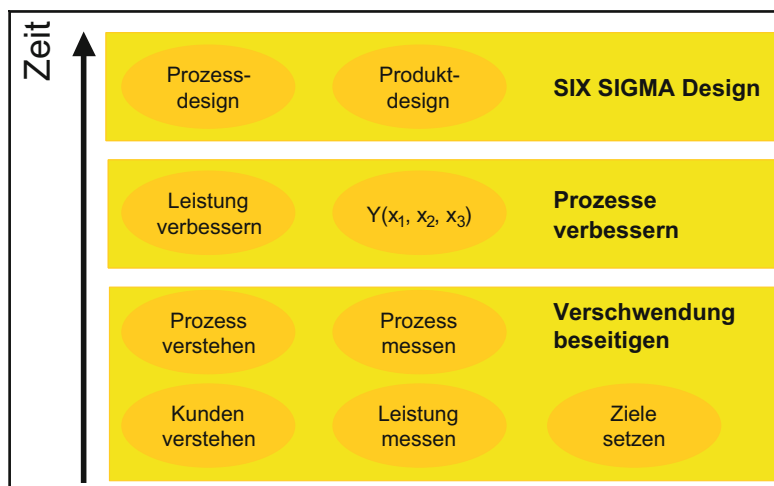


Bild 1.15 Langzeitstrategie bei Six Sigma

Six Sigma als Unternehmensphilosophie und Werthaltung

Die Werte eines Unternehmens drücken sich aus in Begriffen wie **Kundenorientierung**, **Prozessorientierung**, **Wirtschaftlichkeit**, **Kostenorientierung**, **kontinuierliche Verbesserung**, usw. Mit Six Sigma kann die Unternehmensleitung erreichen, dass diese Begriffe zum Bestandteil der Werthaltung jeden Mitarbeiters werden. Als entscheidend für die Verankerung der Werte gilt das Festlegen von Kriterien, Merkmalen, Kennzahlen und Zielen. Für die Kundenzufriedenheit bedeutet das z. B., dass im Rahmen von Six Sigma Projekten die kritischen Merkmale für das Produkt aus der Sicht des Kunden definiert werden. Für jedes dieser kritischen Merkmale sind Kennzahlen und Ziele festzulegen. Diese Kennzahlen müssen von allen Prozessbeteiligten deutlich sichtbar eingefordert werden. Wichtige Ziele werden gemessen, verfolgt, berichtet und verbessert.

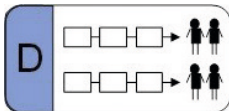
Das Wirkprinzip von Six Sigma

Produkte und Dienstleistungen für den Kunden sind das Ergebnis von Prozessen. Will man die Produkte und Dienstleistungen verbessern, so müssen die verursachenden Prozesse verbessert werden. Aus diesem Grund konzentriert man sich bei Six Sigma auf die Prozesse und nicht auf die Produkte. Ein wichtiges Ziel von Six Sigma Projekten ist die Realisierung von wertschöpfungsorientierten Prozessen, ausgehend von den Kundenforderungen bis hin zur Erfüllung dieser Forderungen. Die Ziele für ein Projekt sind in der Regel Zeit-, Kosten- und Qualitätsziele. Six Sigma konzentriert sich auf Abweichungen im Prozess, bezogen auf die Lieferzeit, die Kosten und die Qualität. Prozesse, die große Schwankungen in Bezug auf die Lieferzeit, die Kosten oder den Fehleranteil aufweisen, haben Streuungsursachen, die nicht beherrscht sind. Mithilfe der Projektphasen Definieren, Messen, Analysieren, Verbessern und Überwachen (engl. DMAIC für *Define, Measure, Analyse, Improve, Control*) werden diese Streuungsursachen erkannt und beseitigt.

1.8.3 Die Projektphasen bei Six Sigma in der Produktion

Jedes Projekt durchläuft die fünf Phasen, die als DMAIC bekannt geworden sind.

Definieren (Define)



In dieser Phase wird der Prozess ausgewählt, der mithilfe eines Six Sigma Projektes verbessert werden soll. Anhand von Auswahlkriterien werden mehrere Projektvorschläge gewichtet und das Projekt mit der höchsten Priorität ausgewählt.

In diese Phase gehört auch die Definition des Projektes hinsichtlich der Aufgabenteilung, Umfang, Ziele, Teamzusammensetzung und die Projektplanung.

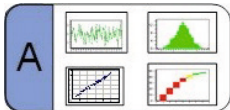
Messen (Measure)



Dies ist die erste Projektphase. Ausgehend von den Kundenforderungen werden die kritischen Merkmale aus der Sicht des Kunden für das Produkt oder die Dienstleistung bestimmt. Anschließend wird die Prozessfähigkeit für die kritischen

Merkmale und das vorhandene Verbesserungspotenzial bestimmt. Aus den Messungen lässt sich erkennen, wo innerhalb der Prozesskette die größten Abweichungen und Störungen auftreten. Diese Probleme werden vom Team zuerst angegangen. Das Ergebnis dieser Phase ist die eindeutige Problembeschreibung, belegt durch Zahlen, Daten und Fakten und eine Prioritätenliste der zu lösenden Probleme.

Analyse (Analyse)



Nachdem bekannt ist, wo Störungen auftreten, geht es darum, diese Störungen genau zu beschreiben. Woher kommen die Störungen und was ist die Ursache? Als Hilfsmittel für diese Detektivarbeit kommen viele statistische Werkzeuge zum Einsatz. Das Ergebnis dieser Phase sind Hypothesen für die Störungsursachen, die durch Zahlen, Daten und Fakten zu begründen sind.

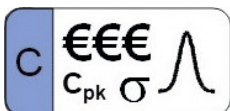
Verbessern (Improve)



Die Verbesserung besteht darin, die Störungsursachen abzustellen bzw. deren Einfluss zu verringern. Das Team muss sich Maßnahmen überlegen, mit denen die Störungsursachen abgestellt werden können und die Umsetzung dieser Maßnahmen planen und durchführen.

Auch in dieser Phase kommen viele statistische Werkzeuge zum Einsatz, wie z. B. Regressionsanalyse und Versuchsplanung. Das Ergebnis dieser Phase ist das Abstellen der Störungsursachen und damit eine Verbesserung des Prozesses.

Überwachen (Control)



Um die erreichten Verbesserungen fortlaufend zu erhalten, müssen Maßnahmen zur Überwachung überlegt und eingeführt werden. Zum einen müssen Methoden zur Prozesssteuerung und -überwachung geplant und umgesetzt werden. Man

denke hierbei an Regelkarten, Control-Pläne und ähnliches. Weitere wichtige Tätigkeiten sind:

- Schulen der Mitarbeiter vor Ort
- Dokumentation veränderter Prozessbedingungen in Richtblättern, Arbeitsanweisungen, Prüfanweisungen/-plänen und Verfahrensanweisungen.

Für die kontinuierliche Verfolgung müssen die zu berichtenden Kennzahlen und die Entstehung von Berichten geplant und umgesetzt werden. Nach Abschluss dieser Phase wird das Projekt durch das Management abschließend bewertet (Review).

1.8.4 Six Sigma in der Entwicklung

Mit dem Akronym DFSS (Design for Six Sigma) wird die Anwendung von Six Sigma Methoden im Entwicklungsbereich bezeichnet. Das Ziel des DFSS-Ansatzes ist folgerichtig: von Anfang an das richtige tun. Das Zusammenspiel zwischen den Projektzyklen DMAIC, DFSS und dem Management-Regelkreis PDCA ist in Bild 1.16 dargestellt.

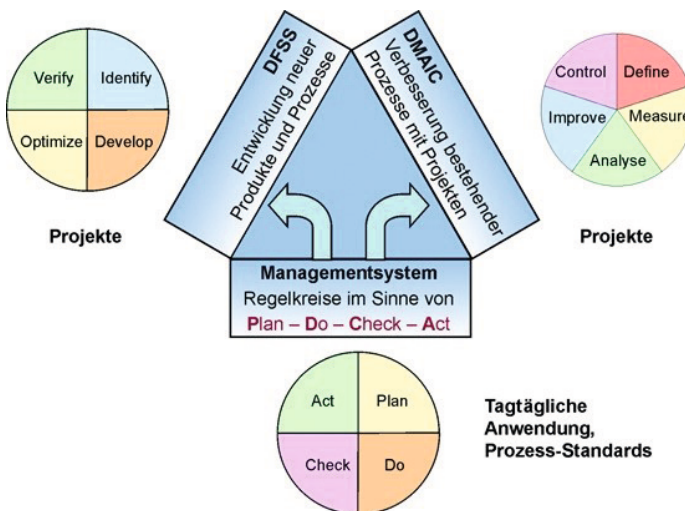


Bild 1.16 Zusammenspiel zwischen den Projektzyklen DMAIC, DFSS und dem Management-Regelkreis PDCA

Der größte Unterschied zwischen DMAIC und DFSS ist die Projektdauer: Entwicklungsprojekte haben in der Regel eine deutlich längere Laufzeit als drei Monate. Weitere Unterschiede ergeben sich aus der Anwendung: Während ein typisches DMAIC-Projekt bestehende Prozesse verbessert, ist DFSS ein Projektansatz

der Neugestaltung; konsequent orientiert an den Kundenbedürfnissen und -erwartungen. Dennoch ist die Verbindung der beiden Projektwelten viel natürlicher als man auf dem ersten Blick vermuten würde. Durch DMAIC-Projekte werden Prozesse von Jahr zu Jahr perfektioniert. Weitere Verbesserungen sind dann oft nur durch eine komplette Neugestaltung von Produkten und Prozessen möglich. So gesehen ist ein Hand-in-Hand gehen von DMAIC- und DFSS-Themen nur allzu naheliegend.

Verfolgt man die Literatur zum Thema, so fällt folgendes auf: Das Akronym DFSS wird noch überall gleich verstanden, jedoch bestehen größere Unterschiede bei dem genannten Phasenmodell für die Projektarbeit. Hier eine kleine Liste von Vorschlägen für DFSS-Phasenmodellen aus vier Literaturquellen:

- IDOV (Identify, Develop, Optimize, Verify)
- DMADV (Define, Measure, Analyse, Design, Verify)
- ICOV (Identify, Characterize, Optimize, Verify)
- CDOV (Concept, Design, Optimize, Verify).

Warum diese Vielfalt an Vorschlägen? Das ist zum einen im Copyright begründet. Ein anderer Grund ist, dass für jede Branche andere Bedingungen gelten. Das Entwickeln eines neuen Prozessors ist sicherlich völlig anders geartet, als das Entwickeln eines neuen Taschentuches. Da lassen sich leider nur Kernaussagen verallgemeinern. Die konkrete Ausgestaltung der Projektphasen bei Entwicklungsprojekte bleibt eine vom Unternehmen individuell zu lösende Aufgabe. Die vorgestellten DFSS-Konzepte können jedoch die individuelle Gestaltung erheblich erleichtern. Insofern lohnt sich die Beschäftigung mit DFSS in jedem Fall.

2

Grundlagen der technischen Statistik

■ 2.1 Einführung

Unter Statistik versteht man die Methoden zur Gewinnung, Sammlung, Ordnung und Auswertung von Beobachtungsdaten, um auf dieser Erfahrungsgrundlage vernünftige Entscheidungen treffen zu können. Insbesondere kommt unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit den statistischen Methoden eine immer größere Bedeutung zu.

Da eine vollständige Untersuchung des interessierenden Merkmals der Grundgesamtheit häufig nicht möglich ist (z. B. durch Zeitaufwand oder Zerstörung), führt man eine auf Stichproben basierende Untersuchung durch. Der Rückschluss von Stichprobendaten auf die Grundgesamtheit ist dabei von besonderer Wichtigkeit.

Eine einfache Übertragung der Stichprobendaten auf die Grundgesamtheit ist jedoch nicht möglich. Ein Rückschluss von den Stichprobenkennwerten auf die Grundgesamtheit ist unter bestimmten Voraussetzungen zulässig.

Um „Statistische Verfahren“ zur Maschinen- und Prozessqualifikation besser verstehen zu können, müssen Grundlagen aus folgenden Bereichen geschaffen werden:

- Begriffsdefinitionen
- statistische Kennwerte
- numerische Testverfahren
- Operationscharakteristiken
- Transformation von Messwertreihen
- Verteilungsmodelle und deren Beurteilung
- Wahrscheinlichkeitsverteilungen
- Qualitätsregelkartentechnik
- Stabilitätskriterien
- Fähigkeitsstudien

- Qualitätskennzahlen
- Varianzanalyse
- Regressions- und Korrelationsbetrachtungen.

Diese genannten Themen werden in den folgenden Abschnitten besprochen.

Für eine wirtschaftlich sinnvolle Nutzung dieser statistischen Verfahren müssen sie weitestgehend automatisch durchgeführt werden. Dabei ist letztlich auch auf die korrekte Interpretation der Ergebnisse größten Wert zu legen. Die allseits gern gebrauchte Aussage: „Traue keiner Statistik, die du nicht selbst gefälscht hast“ ist darin begründet. Die angewandten statistischen Verfahren sind in sich korrekt, die Frage ist nur, ob sie auf den vorliegenden Sachverhalt angewandt werden können oder nicht. Daher sind neben den Verfahren selbst vor allem die Beurteilungskriterien zu betrachten, die Aussagen über deren Eignung zulassen.

■ 2.2 Grundmodell der technischen Statistik

Während sich die **deskriptive** oder **beschreibende** Statistik mit der Untersuchung und Beschreibung möglichst der ganzen Grundgesamtheit begnügt, wird bei der **induktiven** oder **analytischen Statistik** nur ein Teil der Grundgesamtheit (**Stichprobe**) untersucht, der für die Grundgesamtheit repräsentativ ist. Anhand einer Stichprobe werden die Parameter eines statistischen Modells – z. B. eines Verteilungsmodells – geschätzt. Da ein Verteilungsmodell die möglichen Merkmalswerte aller Einheiten in der Grundgesamtheit repräsentiert, wird also von den Beobachtungen eines Teils der Grundgesamtheit auf die Grundgesamtheit insgesamt geschlossen, d. h. man geht induktiv vor. Bei der Entnahme der Stichprobe muss gewährleistet sein, dass jede Einheit der Grundgesamtheit die gleiche Chance hat, in die Stichprobe zu kommen. Die Stichprobe kann dann als repräsentativer Teil der Grundgesamtheit angesehen werden.

Induktive statistische Methoden sind überall dort erforderlich, wo Ergebnisse nicht beliebig oft und exakt reproduzierbar sind. Die Ursachen der Nichtreproduzierbarkeit liegen in unkontrollierten und unkontrollierbaren Einflüssen. Diese Einflüsse führen zu einer Streuung der erfassten Merkmalswerte. Da infolge dieser Streuung ein Einzelwert kaum exakt reproduzierbar sein wird, sind sichere und eindeutige Schlussfolgerungen unmöglich. Erst durch eine entsprechend große Stichprobe ist eine mit hoher Wahrscheinlichkeit zutreffende Aussage möglich.

Wird von der Stichprobe auf die Grundgesamtheit geschlossen, handelt es sich um einen sogenannten „**indirekten Schluss**“. Dabei ist für jeden geschätzten Kennwert der „**Vertrauensbereich**“ (s. Abschnitt 2.5, Abschnitt 2.6 und Abschnitt 5.7)

zu bestimmen. Typische Anwendung ist die Bestimmung von Fähigkeitsindizes. Das errechnete Ergebnis basiert auf einer Zufallsstichprobe. Eine andere Stichprobe führt zwangsläufig zu einem anderen Ergebnis. Dies bedeutet, dass der „wahre Wert“ des Ergebnisses etwas größer oder kleiner sein kann. In welchem Bereich dieser Wert mit welcher Wahrscheinlichkeit liegt, kann durch den Vertrauensbereich abgeschätzt werden. Dieser Bereich müsste zur Beurteilung der Güte bei jedem statistischen Kennwert, aber insbesondere bei Fähigkeitsindizes, mit angegeben werden.

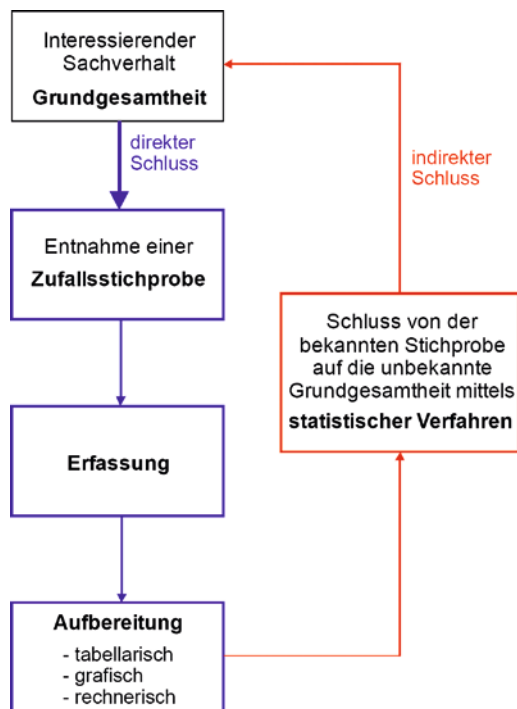


Bild 2.1 Grundmodell der techn. Statistik

Das Bewusstsein für diesen Sachverhalt muss vorhanden sein, um unnütze Diskussionen in der Praxis zu vermeiden.

Ein „**direkter Schluss**“ liegt vor, wenn von einer bekannten oder als bekannt vorausgesetzten Grundgesamtheit auf das Verhalten von Stichproben geschlossen wird. Hierbei gilt es, die „**Zufallsstrebereiche**“ (s. Abschnitt 2.6 und Abschnitt 5.7) zu bestimmen. Die Qualitätsregelkarte basiert auf dieser Grundlage.

■ 2.3 Klassifizierung von Produktmerkmalen

2.3.1 Merkmalsarten

Betrachtet man beispielsweise die Merkmale seines Fahrzeugs im Fahrzeugschein, so sieht man dort die Zulassungsstelle, die Typbezeichnung, die Länge, das Gewicht, die Farbe, die Leistung, den Reifentyp, usw. Darunter sind Merkmale, die sich als Vielfaches einer Einheit messen lassen (Gewicht und Leistung). Andere Merkmale lassen sich nicht quantifizieren (Zulassungsstelle, Typbezeichnung, Reifentyp). Daher liegt es nahe, die Merkmale in die Kategorien **quantitativ** und **qualitativ** einzuteilen.

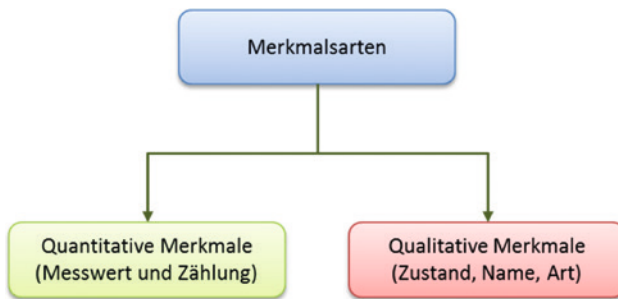


Bild 2.2 Einteilung der Merkmale in die Kategorien qualitativ und quantitativ

Eine weitere Möglichkeit Daten zu kategorisieren orientiert sich an der für die Merkmalswerte verwendeten Messskala. Man unterscheidet vier Skalen, die in der folgenden Tabelle zusammenfassend dargestellt sind.

Art der Messskala	Zulässige mathem. Operationen	Besondere Eigenschaft
Nominal	=, ≠	
Rang (Ordinal)	=, ≠, >, <	Abstände zwischen den Rängen sind nicht eindeutig definiert
Intervall	=, ≠, >, <, +, -	Abstände = Vielfaches einer Einheit Kein natürlicher Nullpunkt
Verhältnis	=, ≠, >, <, +, -, ×, ÷	Abstände = Vielfaches einer Einheit Natürlicher Nullpunkt

Nominalskalierte Merkmalswerte

Eindeutige Zuordnung von Symbolen

- Eine Nominalskala ordnet den Merkmalen Symbole zu.

- Objekten mit identischer Merkmalsausprägung werden identische Symbole zugeordnet.
- Objekten mit verschiedenartiger Merkmalsausprägung werden verschiedene Symbole zugeordnet.

Die Objekte werden anhand der Merkmalsausprägung in Kategorien oder Gruppen eingeteilt, Objekte mit identischer Merkmalsausprägung bilden eine Kategorie oder Gruppe.

Übliche statistische Kenngrößen

- absolute und relative Häufigkeit je Kategorie
- häufigster Wert (Mode oder Modus)
- Kontingenztafeln (χ^2 -Techniken).



Fallbeispiel

- Die Anzahl der Hotelgäste wird in Gruppen nach Nationalität unterteilt.
- Die Häufigkeit verkaufter Fahrzeuge wird nach Modellreihe kategorisiert.

Rang- oder ordinalskalierte Merkmalswerte

Eine Ordinalskala ordnet den Merkmalen Zahlen zu, die eine Rangordnung repräsentieren.

- Merkmalen mit identischer Ausprägung werden identische Werte zugeordnet.
- Je stärker der Grad der Merkmalsausprägung ist, desto höher ist der zugeordnete Zahlenwert.

Fehlende Einheit und nicht definierte Abstände

- Das Bilden von Differenzen ist nicht sinnvoll, da die Abstände zwischen direkt aufeinanderfolgenden Zahlen nicht das Vielfache einer definierten Einheit sind.



Fallbeispiel Schulnote

Der Abstand zwischen den Noten 1 und 2 ist nicht direkt vergleichbar mit dem Abstand zwischen den Noten 3 und 4, da es keine eindeutige „Noten-Einheit“ gibt.

Übliche statistische Kenngrößen

- Median
- Spannweite
- Rangkorrelation.

Intervallskala

Ein Merkmalswert besteht aus Zahlenwert und Einheit.

- Die Intervallskala ordnet den Merkmalen Zahlenwerte zu, die ein Vielfaches einer festgelegten Einheit sind.

Kein natürlicher Nullpunkt

- Eine Intervallskala besitzt keinen natürlichen Nullpunkt, wodurch das Bilden von Verhältnissen nicht möglich ist.



Fallbeispiel Kalenderdatum

Keine Verhältnisbildung

Der 14. April 2013 ist nicht doppelt so groß wie der 7. April 2013.

Die Differenz zwischen den beiden Tagen ist ein Vielfaches der Einheit Tag:
Zeitdifferenz = 7 d.

Übliche statistische Kennwerte

- Mittelwert
- Standardabweichung
- Korrelationskoeffizient nach Pearson.

Verhältnisskala

Ein Merkmalwert besteht aus Zahlenwert mal Einheit.

- Eine Verhältnisskala ordnet den Merkmalen Zahlenwerte zu, die ein Vielfaches einer festgelegten Einheit sind.

Ein natürlicher Nullpunkt

- Eine Verhältnisskala besitzt einen natürlichen Nullpunkt, wodurch das Bilden von Verhältnissen möglich ist.



Fallbeispiel Länge

Verhältnisbildung möglich

- Die Länge $l_1 = 60$ cm ist dreimal so groß wie die Länge $l_2 = 20$ cm

Vielfaches einer Einheit:

- Die Differenz $d = l_1 - l_2 = 40$ cm ist das Vielfache der Einheit Zentimeter

Übliche statistische Kennwerte

- arithmetischer, geometrischer und harmonischer Mittelwert
- Standardabweichung

- Korrelationskoeffizient
- Variationskoeffizient.

Eine dritte Möglichkeit besteht darin, die Merkmale anhand der möglichen Werte in eine der Kategorien **diskret** und **kontinuierlich** einzuteilen. Kontinuierlich bedeutet, dass zwischen zwei beliebig nah beieinander liegenden (Zahlen-)Werten – zumindest theoretisch – stets ein weiterer Wert vorkommen kann. Diskret bedeutet, dass es einen kleinsten Abstand zwischen zwei Werten gibt, innerhalb dessen kein weiterer Wert vorkommen kann. Dementsprechend sind die Werte einer Nominal- oder Rangskala in die Kategorie diskret einzustufen und die Werte einer Intervall- oder Verhältnisskala in die Kategorie kontinuierlich.

2.3.2 Erfassung von Merkmalswerten

Für eine umfassende statistische Auswertung sind die Messwerte, die ein Produktmerkmal repräsentieren, möglichst anwenderfreundlich, effizient und sicher zu erfassen. Anschließend sind die Datensätze entweder dezentral auf dem jeweiligen Erfassungssystem oder zentral in einer Datenbank zu hinterlegen. Grundlage dazu ist der Prüfplan. Dieser enthält die zu messenden Produktmerkmale sowie die Reihenfolge, in der die jeweiligen Merkmale gemessen werden sollen. Im Prüfplan können sowohl quantitative als auch qualitative Merkmale enthalten sein.

Erfassung von kontinuierlichen Merkmalswerten

Kontinuierliche Merkmalswerte sollten möglichst automatisiert erfasst werden. Dadurch können Fehleingaben und Übertragungsfehler weitestgehend vermieden werden. Die meisten Erfassungssysteme sind in der Lage, die gemessenen Werte entweder direkt in eine Datei oder online über eine serielle Schnittstelle auf ein Rechnersystem zu übertragen.

Bei der Erfassung der Merkmalswerte sollten auch immer Zusatzinformationen wie Datum/Uhrzeit, gegebenenfalls Ereignis, Maschinen- und Prozessparameter erfasst werden. Nur so ist eine umfassende Analyse auf die Ursache möglich, wonach Rückschlüsse auf Veränderungen gezogen werden können. Dabei müssen die Zusatzdaten in den Katalogen hinterlegt werden, um eindeutige Zuordnungen treffen zu können. Damit wird jedem Messwert quasi für das jeweilige Zusatzdatenfeld ein Code zugeordnet. Durch die Referenz auf einen entsprechenden Katalog ist für den jeweiligen Code der erfasste Langtext bekannt.

Bei der Erfassung der Werte von Hand sollten bei der Eingabe immer Plausibilitätsgrenzen im Hintergrund vorhanden sein. Überschreiten eingegebene Messwerte diese Grenzwerte, muss eine Fehlermeldung erscheinen, um auf eventuelle Fehleingaben hinzuweisen. Typische Eingabefehler sind Tippfehler, fehlendes oder falsches Vorzeichen bzw. fehlende oder falsch gesetzte Nachkommastellen.