

Wilhelm Kleppmann

Praxisreihe
Qualität



Versuchs- planung

Produkte und
Prozesse optimieren



10., überarbeitete Auflage

HANSER

Kleppmann
Versuchsplanung



bleiben Sie auf dem Laufenden!

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

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Herausgeber der Praxisreihe Qualität (vormals Praxisreihe Qualitätswissen):
von 1991 (Gründungsjahr) bis 2016 Franz J. Brunner; seit 2016 Kurt Matyas.

In der Praxisreihe Qualität sind bereits erschienen:

Jörg Brenner

Lean Production

Praktische Umsetzung zur Erhöhung der Wertschöpfung
3., überarbeitete Auflage
ISBN 978-3-446-45664-8

Jörg Brenner

Lean Administration

Verschwendung erkennen, analysieren, beseitigen
ISBN 978-3-446-45472-9

Franz J. Brunner

Japanische Erfolgskonzepte

Kaizen, KVP, Lean Production Management, Total
Productive Maintenance, Shopfloor Management, Toyota
Production Management, GD3 - Lean Development
4., überarbeitete Auflage
ISBN 978-3-446-45428-6

Franz J. Brunner

Qualität im Service

Wege zur besseren Dienstleistung
ISBN 978-3-446-42241-4

Franz J. Brunner, Karl W. Wagner

Mitarbeit: Peter H. Osanna, Kurt Matyas, Peter Kuhlant

Qualitätsmanagement

Leitfaden für Studium und Praxis
6., überarbeitete Auflage
ISBN 978-3-446-44712-7

Werner Friedrichs

Das Fitnessprogramm für KMU

Methoden für mehr Effizienz im Automobil-, Anlagen- und
Sondermaschinenbau
ISBN 978-3-446-45341-8

Werner Friedrichs

Ressourcenmanagement in KMU

ISBN 978-3-446-45766-9

Menderes Güneş, Marwan Hamdan, Mirko Klug

Gewährleistungsmanagement

ISBN 978-3-446-44795-0

Marco Einhaus, Florian Lugauer, Christina Häußinger

Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik

Der Schnelleinstieg für (angehende) Führungskräfte:
Basiswissen, Haftung, Gefährdungen, Rechtslage
ISBN 978-3-446-45474-3

René Kiem

Qualität 4.0

QM, MES und CAQ in digitalen Geschäftsprozessen der
Industrie 4.0
ISBN 978-3-446-44736-3

Jörg Brenner

Shopfloor Management und seine digitale Transformation

Die besten Werkzeuge in 45 Beispielen
ISBN 978-3-446-46000-3

Veit Kohnhauser, Markus Pollhamer

Entwicklungsqualität

ISBN 978-3-446-42796-9

Karl Koltze, Valeri Souchko

Systematische Innovation

TRIZ-Anwendung in der Produkt- und Prozessentwicklung
2., überarbeitete Auflage
ISBN 978-3-446-45127-8

Kurt Matyas

Instandhaltungslogistik

Qualität und Produktivität steigern
7., erweiterte Auflage
ISBN 978-3-446-45762-1

Arno Meyna, Bernhard Pauli

Zuverlässigkeitstechnik

Quantitative Bewertungsverfahren
2., überarbeitete und erweiterte Auflage
ISBN 978-3-446-41966-7

Markus Schneider

Lean und Industrie 4.0

Eine Digitalisierungsstrategie mit der Wertstrom-
methode und Information Flow Design
ISBN: 978-3-446-45917-5

Wilfried Sihl, Alexander Sunk, Tanja Nemeth,
Peter Kuhlant, Kurt Matyas

Produktion und Qualität

Organisation, Management, Prozesse
ISBN 978-3-446-44735-6

Friedrich Peschke, Carsten Eckhardt

Flexible Produktion durch Digitalisierung

Entwicklung von Use Cases
ISBN 978-3-446-45746-1

Konrad Wälder, Olga Wälder

Statistische Methoden der Qualitätssicherung

Praktische Anwendung mit MINITAB und JMP
ISBN 978-3-446-43217-8

Johann Wappis

Null-Fehler-Management

Umsetzung von Six Sigma
6., aktualisierte Auflage
ISBN 978-3-446-45875-8

Wilhelm Kleppmann

Versuchsplanung

Produkte und Prozesse optimieren

10., überarbeitete Auflage

Praxisreihe Qualität
Herausgegeben von Kurt Matyas

HANSER

Der Autor:

Prof. Dr. Wilhelm Kleppmann, Hochschule Aalen, Beethovenstraße 1, 73430 Aalen
wilhelm.kleppmann@hs-aalen.de

Zu diesem Buch gehört ein Download. Unter dem Reiter Extras können Sie sich hier die Dateien zum Buch herunterladen:

<https://www.hanser-fachbuch.de/buch/Versuchsplanung/9783446461468>



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. Herausgeber, 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 Herausgeber, 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.

© 2020 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg

Herstellung: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

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

Titelgrafik: © [istockphoto.com/matdesign24](https://www.istockphoto.com/matdesign24)

Coverrealisation: Max Kostopoulos

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: Hubert & Co. KG Buchpartner, Göttingen

Printed in Germany

Print-ISBN: 978-3-446-46146-8

E-Book-ISBN: 978-3-446-46397-4

Vorwort

Total Quality Management (TQM), Prozessorientierung in der DIN ISO 9001, SixSigma-Programme, Kontinuierliche Verbesserungsprogramme (KVP), Kaizen, ... - uns allen ist die Notwendigkeit der ständigen Verbesserung bewusst. Versuchsplanung ist eine Sammlung von Ideen und Verfahren, dabei systematisch vorzugehen, um mit möglichst geringem Aufwand möglichst viel zu lernen.

Im Rahmen einer SixSigma-Strategie ist Versuchsplanung das Werkzeug zur eigentlichen Verbesserung und nimmt damit eine zentrale Stellung ein. Dadurch hat Versuchsplanung in den letzten Jahren wesentlich an Bedeutung und Verbreitung gewonnen, und so ist nun schon die 10. Auflage dieses Buches erforderlich. Diese Chance habe ich wieder zur Aktualisierung und Ergänzung genutzt.

Ziel ist es, Praktikern in Entwicklung, Konstruktion und Fertigung, sowie Studenten einen anwendungsorientierten Einstieg und Überblick zu geben. Die Methoden der klassischen Statistischen Versuchsplanung werden mit Ideen von Shainin, Taguchi u. a. zu einer neuen Kombination verbunden.

SixSigma und Versuchsplanung sind Teamarbeit. Jedes Teammitglied muss über Ziele, Möglichkeiten und die prinzipielle Vorgehensweise Bescheid wissen. Aber nicht jedes Teammitglied muss alle Einzelheiten kennen.

- Kapitel 1 bis 5 geben einen allgemeinen Überblick über die Versuchsplanung und behandeln einfache Verfahren, die bei der Vorbereitung weiterer Versuche nützlich sind. Sie sind für alle Teammitglieder gedacht.
- Kapitel 6 bis 12 behandeln die statistischen Grundlagen und die wichtigsten Versuchspläne und ihre Auswertung. Sie wenden sich an das Teammitglied, das die Versuche plant und die Ergebnisse dann auswertet. Abschnitte, die mit einem Stern * gekennzeichnet sind und Ergänzungen in Fußnoten sind für das Verständnis der folgenden Kapitel nicht erforderlich und können zunächst ausgelassen werden.
- Kapitel 13 bis 20 behandeln verschiedene weiterführende Themen. Sie können bei Bedarf und unabhängig voneinander gelesen werden.

Im Download-Bereich des Hanser-Verlags zu diesem Buch finden Sie Visualisierungen in JavaScript, die Ihnen dabei helfen sollen, statistische Ideen besser zu begreifen. Erleben Sie selbst, wie Versuchsergebnisse streuen, was ein Vertrauensbereich ist, wie lineare Regression funktioniert und wie ein Fertigungsprozess immer besser wird.

Um das Verständnis für die Bedeutung statistischer Aussagen zu fördern, werden die meisten Beispiele ausführlich vorgerechnet. Eingestreute Übungsaufgaben verdeutlichen

und vertiefen die jeweiligen Inhalte. Nutzen Sie diese Übungsmöglichkeit – die folgende Lösung dient der Selbstkontrolle.

Obwohl aus didaktischen Gründen die Beispiele und Aufgaben hier von Hand vorgerechnet werden, empfehle ich ab Kapitel 6 parallel den Einsatz einer Software. Sie vereinfacht die Auswertung wesentlich und erlaubt vielfältige grafische Darstellungen.

Die Beschreibung der Versuchsplanung in diesem Buch ist unabhängig von einer speziellen Software. Viele gute Programme sind erhältlich. Kapitel 19 gibt Entscheidungshilfen zur Auswahl und einen Überblick über neun dieser Programme. Im Download-Bereich des Hanser-Verlags zu diesem Buch finden Sie Dateien mit Beispielen aus diesem Buch in den Formaten dieser Programme. Somit können Sie die Programme anhand bekannter Beispiele testen, direkt vergleichen und das Programm auswählen, das Ihnen am besten gefällt. Wenn Sie dann die Beispiele mit der gewählten Software nachvollziehen, werden Sie feststellen:

- Das Aufstellen von Versuchsplänen und die Auswertung der Versuchsergebnisse sind nicht schwer.
- Die Darstellung der Ergebnisse unterscheidet sich etwas von der Darstellung in diesem Buch. Jede Software ist anders, anhand der durchgerechneten Beispiele sollte es jedoch kein Problem sein, die Bedeutung der Ausgaben zu verstehen.
- Mit etwas Übung erscheint dann alles plötzlich ganz einfach. Aber auch darin liegt ein gewisses Risiko. Vergewissern Sie sich immer, dass die Daten und die Ergebnisse sinnvoll sind. Verwenden Sie Ihren gesunden Menschenverstand. Versuchsplanung ist ein sehr wertvolles Hilfsmittel. Aber es soll den gesunden Menschenverstand nicht ersetzen, sondern schärfen.

Als erste eigene Anwendung empfehle ich ein überschaubares Problem mit nur wenigen Faktoren und klar definierten Zielen. Bitte achten Sie auf die sorgfältige Vorbereitung Ihrer Versuche – sie ist entscheidend für den Erfolg.

Ich möchte darauf hinweisen, dass wesentliche Teile dieses Buches (insbesondere in den Kapiteln 7 bis 12) ursprünglich den ebenfalls von mir erstellten Schulungsunterlagen der Deutschen Gesellschaft für Qualität e. V. (DGQ), Frankfurt am Main, entnommen sind. Der Lehrgang „Statistische Versuchsplanung“ wird durch dieses Buch vertieft und ergänzt. Daher kann das Buch als begleitende oder weiterführende Literatur verwendet werden. Umgekehrt bietet der Lehrgang eine gute Einführung bzw. Ergänzung zu diesem Buch. Interessierte Leser können sich unter www.dgq.de über das Weiterbildungsangebot der DGQ informieren.

Zum Schluss möchte ich allen danken, die zu diesem Buch beigetragen haben, insbesondere der DGQ für die Genehmigung, Teile aus ihren Lehrgangsunterlagen zu verwenden, B. Schäfer und anderen Lesern für ihre hilfreichen inhaltlichen Anregungen und den Projektarbeitern der Hochschule Aalen für die Visualisierungen in JavaScript.

Allen Lesern bin ich dankbar für konstruktive Anregungen und Kritik. Ich wünsche Ihnen viel Erfolg bei der Anwendung der Versuchsplanung.

Aalen, im September 2019

Wilhelm Kleppmann

Inhalt

Vorwort	V
1 Einführung	1
1.1 Warum Versuche?	1
1.2 Warum Statistik?	1
1.3 Warum Versuchsplanung?	4
1.4 Welche Art von Ergebnissen kann man erwarten?	6
1.5 Versuche oder systematische Beobachtung?	7
1.6 Versuchsplanung und Six-Sigma-Strategie	8
2 Ausgewählte Begriffe	11
2.1 Zielgrößen	12
2.2 Einflussgrößen	12
2.3 Steuergrößen	13
2.4 Störgrößen	13
2.5 Faktoren	14
2.6 Faktorstufen	14
2.7 Quantitative und qualitative Faktoren	15
3 Vorgehensweise im Überblick	17
3.1 Ausgangssituation beschreiben	17
3.2 Untersuchungsziel festlegen	19
3.2.1 Optimale Lage des Mittelwerts	19
3.2.2 Reduzierung der Streuung/Robustheit	20
3.2.3 Erkennen der wichtigsten Störgrößen in der Fertigung	21
3.2.4 Gleichzeitig fertigen und lernen	22
3.2.5 Funktion und Zuverlässigkeit nachweisen	22
3.3 Zielgrößen und Faktoren festlegen	22
3.3.1 Auswahl der Zielgrößen	22
3.3.2 Sammlung der Einflussgrößen	24
3.3.3 Auswahl der Faktoren	25
3.3.4 Festlegung der Faktorstufen	26
3.3.5 Einflussgrößen, die nicht untersucht werden	28
3.4 Versuchsplan aufstellen	29
3.4.1 Festlegung der Faktorstufenkombinationen	29

3.4.2	Anzahl der Realisierungen	30
3.4.3	Blockbildung	31
3.4.4	Randomisierung	31
3.4.5	Aufwandsabschätzung	33
3.5	Versuche durchführen	35
3.5.1	Vorbereitung	35
3.5.2	Durchführung	36
3.6	Versuchsergebnisse auswerten	37
3.7	Ergebnisse interpretieren und Maßnahmen ableiten	40
3.7.1	Interpretation	40
3.7.2	Maßnahmen	41
3.8	Absicherung, Dokumentation, weiteres Vorgehen	42
3.8.1	Absicherung der Verbesserungen	42
3.8.2	Dokumentation	42
3.8.3	Weiteres Vorgehen	43
4	Systematische Beobachtung	45
4.1	Multi-Vari-Bild	45
4.2	Darstellung der örtlichen Verteilung von Fehlern	49
4.3	Prozessvergleich	52
4.4	Paarweiser Vergleich von Produkten	54
5	Einfache Versuche	57
5.1	Variablenvergleich zur Prozessverbesserung	57
5.2	Komponententausch zur Produktverbesserung	61
5.3	Überblick über die Methoden nach D. Shainin	64
6	Statistische Grundlagen	65
6.1	Verteilung	65
6.1.1	Häufigkeitsverteilung von Versuchsergebnissen	65
6.1.2	Verteilungsdichte und Verteilungsfunktion	68
6.1.3	Normalverteilung	70
6.2	Auswertung einer Stichprobe	71
6.2.1	Repräsentative Stichprobe	71
6.2.2	Eintragung ins Wahrscheinlichkeitsnetz	73
6.2.3	Schätzwerte für Mittelwert μ und Varianz σ^2	76
6.2.4	Vertrauensbereiche	77
6.3	Vergleich von zwei Mittelwerten	82
6.3.1	Auswertung von Versuchsergebnissen	83
6.3.2	Festlegung des Stichproben- bzw. Versuchsumfangs	89
6.3.3	Voraussetzungen	91
6.4	Transformation von Messwerten	95
6.4.1	Logarithmische Normalverteilung	95
6.4.2	Poisson-Verteilung	96
6.4.3	Box-Cox-Transformation	98

7	Vollständige faktorielle Versuchspläne	101
7.1	Zwei Faktoren auf je zwei Stufen	101
7.1.1	Versuchsplan und Effekte	101
7.1.2	Auswerteformalismus und Beurteilung der Signifikanz	104
7.1.3	Interpretation von Wechselwirkungen	106
7.1.4	Randomisierung und Blockbildung	108
7.2	k Faktoren auf je zwei Stufen	113
7.2.1	Versuchsplan	113
7.2.2	Auswertung	115
7.2.3	Versuchsumfang	120
7.3	Auswertung von Versuchsplänen mit $n = 1$	121
7.3.1	Wahrscheinlichkeitsdarstellung der Effekte	121
7.3.2	Schätzung der Zufallsstreuung durch „Pooling“	125
7.3.3	Risiken	127
8	Screening-Versuchspläne	129
8.1	Hintergrund	129
8.2	Fraktionelle faktorielle Versuchspläne	130
8.2.1	Der fraktionelle faktorielle 2^{4-1} -Plan als Beispiel	130
8.2.2	Anwendung des 2^{4-1} -Plans zur Blockbildung	134
8.2.3	Fraktioneller faktorieller 2^{k-p} -Plan	137
8.2.4	Was bedeutet Vermengung?	140
8.2.5	Auflösung	143
8.2.6	Überblick über 2^{k-p} -Pläne	144
8.2.7	Praxisbeispiel Reflowlötten	147
8.3	Plackett-Burman-Versuchspläne*	156
8.3.1	Plackett-Burman-Versuchspläne der Auflösung III	157
8.3.2	Plackett-Burman-Versuchspläne der Auflösung IV	159
8.3.3	Übersättigte Pläne	160
8.4	Funktionstest*	160
8.5	Definitive Screening Pläne*	162
8.6	Einsatzempfehlungen	164
9	Robuste Produkte/Prozesse	167
9.1	Ziel und Strategie von G. Taguchi	168
9.1.1	Qualitätsziel: Streuung minimieren	168
9.1.2	Entwicklungsstrategie: Robuste Produkte/Prozesse	168
9.2	Taguchis Versuchspläne und ihre Auswertung	170
9.3	Alternative Ansätze	178
9.3.1	Aus der Differenz von Messwerten abgeleitete Zielgrößen	178
9.3.2	Wechselwirkung zwischen Steuer- und Rauschfaktoren	179
9.4	Anmerkungen zu den „Orthogonalen Feldern“ u. ä.*	180
9.4.1	Orthogonale Felder	180
9.4.2	Lineare Graphen und Dreieckstabellen	181
9.4.3	Dummy Levels, Pseudo Factor Designs, Idle Columns	182

10 Regressionsanalyse	185
10.1 Einfache lineare Regression	186
10.1.1 Methode der kleinsten Quadrate	186
10.1.2 Bestimmtheitsmaß und Korrelationskoeffizient	188
10.1.3 Grafische Beurteilung der Residuen	191
10.1.4 Vertrauensbereiche und Signifikanz	194
10.1.5 Zusammenhang lineare Regression – Mittelwertvergleich	199
10.1.6 Quasilineare Regression	200
10.2 Mehrfache Regression	200
10.2.1 Zweifache lineare Regression	201
10.2.2 Transformierte Einflussgrößen	204
10.2.3 Prinzip der schrittweisen Regression	207
10.2.4 Beurteilung des Regressionsmodells	208
11 Versuchspläne für nichtlineare Zusammenhänge	211
11.1 Zentral zusammengesetzte Versuchspläne	211
11.1.1 Orthogonaler Versuchsplan	213
11.1.2 Technisch bedingte Abweichungen vom Versuchsplan	214
11.1.3 Bekannte nichtlineare Abhängigkeiten	215
11.1.4 Varianten von zentral zusammengesetzten Plänen	215
11.1.5 Praxisbeispiel Laserschneiden	218
11.2 Alternative Pläne*	226
11.2.1 3^k - und 3^{k-p} -Pläne	226
11.2.2 Box-Behnken-Pläne	226
11.2.3 Kleine zusammengesetzte Pläne	227
11.2.4 Optimale Pläne	229
11.3 Grenzen des quadratischen Modells	230
11.3.1 Beispiele und Lösungsmöglichkeiten	231
11.3.2 Allgemeine Lösungsansätze	233
11.4 Einsatzempfehlungen	234
12 Varianzanalyse	237
12.1 Einfache balancierte Varianzanalyse	238
12.2 Mehrfache Varianzanalyse	243
12.3 Feste und zufällige Effekte*	246
12.4 Nicht vollständige Randomisierung*	248
12.4.1 Alle Realisierungen einer Kombination gemeinsam	248
12.4.2 Split-Plot Versuche	249
13 Screening für mehrstufige Faktoren*	251
13.1 Versuchspläne	251
13.2 Auswertung	252
13.3 Einsatzempfehlungen	254

14 Versuchspläne für Mischungen*	255
14.1 Mischungspläne ohne Begrenzungen	256
14.2 Auswertung von Mischungsplänen	258
14.3 Mischungspläne mit Begrenzungen	258
14.4 Kombinierte Versuchspläne	259
15 Spezielle Zielgrößen*	261
15.1 Gut-Schlecht-Ergebnisse	261
15.1.1 Möglichkeiten zur Vermeidung	261
15.1.2 Auswertung	263
15.2 Anzahl Fehler	267
15.3 Mehrere Zielgrößen	268
16 Erweiterung von Versuchsplänen*	277
16.1 Trennung vermengter Wechselwirkungen	277
16.2 Zentrumspunkt	279
16.3 Zuordnung quadratischer Effekte	281
16.4 Nicht realisierbare Faktorstufenkombinationen	283
17 Alternative Modellierungsansätze*	287
17.1 Andere Verteilungen: Maximum Likelihood Prinzip	287
17.2 Robuste Regression	288
17.3 Andere Modellansätze	288
17.3.1 Überanpassung und Unteranpassung	288
17.3.2 Lokale Modelle	290
17.3.3 Neuronale Netze	291
17.3.4 Gaussian Process Models	291
17.3.5 Einsatzempfehlungen	292
18 Sequentielle Optimierungsverfahren*	295
18.1 Evolutionary Operations (EVOP)	296
18.2 Methode des steilsten Anstiegs	298
18.3 Simplexverfahren	299
18.4 Neuere Entwicklungen	301
19 Software*	303
19.1 Allgemeine Hinweise	303
19.2 Beschreibung ausgewählter Programme	304
19.3 Spezielle Anwendungsgebiete	311
20 Beispiele*	315
20.1 Beispiel Motoroptimierung	315
20.2 Literaturbeispiele	320

20.3 Übungsbeispiele	321
20.3.1 Papier-Rotor	321
20.3.2 Nürnberger Trichter	324
Anhang	327
Anhang A – Abkürzungen und Formelzeichen	327
Anhang B – Statistische Tabellen	328
Anhang C – Wegweiser durch die Verfahren	330
Anhang D – Ablauf einer Versuchsplanung	331
Anhang E – Ablauf einer Datenauswertung	332
Anhang F – Glossar deutsch/englisch	333
Anhang G – JavaScript-Visualisierungen zum Herunterladen	337
Anhang H – Beispiele zum Herunterladen	341
Anhang J – Software/Demos im Internet	341
Index	345

* Für das Verständnis der folgenden Kapitel nicht erforderlich

1

Einführung

Dieses Kapitel beschreibt Prinzip und Hintergrund der Versuchsplanung. Unser Ziel ist es, Versuche so zu planen, dass wir die gewünschte Information mit einem Minimum an Zeit und Kosten erhalten.

■ 1.1 Warum Versuche?

Unternehmen müssen sich im Wettbewerb am Markt behaupten. Dazu müssen ihre Produkte und Fertigungsprozesse ständig verbessert werden:

- Der Funktionsumfang der Produkte muss erhöht werden. Die Anforderungen der Kunden müssen immer besser erfüllt werden.
- Die Kosten müssen gesenkt werden, z. B. durch geringere Materialkosten oder höhere Ausbeute.
- Die Entwicklungszeit neuer Produkte und ihre Durchlaufzeit in der Fertigung müssen immer weiter verkürzt werden.

Diese Verbesserungen können nicht allein durch Analyse von Daten aus der Fertigung und kritisches Nachdenken erreicht werden. Dazu sind die Zusammenhänge in Entwicklung, Fertigung und Qualitätsmanagement zu kompliziert und vielschichtig. Um den Einfluss von Designänderungen auf die Eigenschaften eines neuen Produktes oder den Einfluss von Änderungen von Prozessparametern auf das Prozessergebnis zu bestimmen, sind gezielte Versuche notwendig.

Jede Neu- oder Weiterentwicklung durchläuft daher in einem „globalen Versuchsplan“ eine Vielzahl von Versuchen (Pilotversuche, Prototypenversuche, Baumusterprüfungen, Dauerläufe, Zuverlässigkeitstests, Vorserien-Großversuche, Produktionsversuchsreihen u. a.). Versuchsplanung (auch DOE = Design of Experiments genannt) hilft bei jedem dieser Schritte, gezielt zu besseren, wiederholbaren Ergebnissen zu gelangen.

■ 1.2 Warum Statistik?

Trotz aller Sorgfalt erhält man bei der Wiederholung eines einzelnen Versuchs meist nicht genau den gleichen Zahlenwert als Ergebnis. Zufällige Unterschiede, z. B. bei Ausgangs-

material, Umgebungsbedingungen und Messung, führen zu Unterschieden – die Versuchsergebnisse streuen.

Bild 1-1 zeigt ein Beispiel: Auf 30 Teilen wurde unter nominell gleichen Bedingungen galvanisch eine Schicht abgeschieden. Die gemessene Schichtdicke ist bei jedem Teil etwas anders, z. T. aufgrund echter Unterschiede in der Schicht, z. T. aufgrund von Unterschieden bei der Messung. Der Mittelwert der Schichtdicke beträgt in diesem Beispiel $30\ \mu\text{m}$ – er beschreibt die Lage der Werte. Die Einzelwerte streuen um den Mittelwert. Die Standardabweichung der Schichtdicke beträgt $2\ \mu\text{m}$ – sie ist ein Maß für die Breite des Bereichs, über den die Werte streuen. Ca. $\frac{2}{3}$ der Einzelwerte liegen im Bereich Mittelwert \pm Standardabweichung (hier 28 bis $32\ \mu\text{m}$).¹

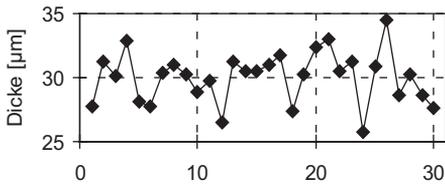


BILD 1-1

Dicke von 30 unter gleichen Bedingungen abgeschiedenen Schichten

Die Streuung der Werte ist kein Problem, wenn sie wesentlich kleiner ist als Unterschiede, die erkannt werden sollen. Bild 1-2 zeigt als Beispiel Messwerte von je 30 Teilen, die auf zwei verschiedenen Anlagen gefertigt wurden. Die Mittelwerte der Dicken betragen $30\ \mu\text{m}$ bzw. $40\ \mu\text{m}$, die Standardabweichungen jeweils $2\ \mu\text{m}$. Auch ohne Einsatz statistischer Verfahren erkennt man in diesem Fall, dass die Teile von der einen Anlage eine größere Schichtdicke haben als die Teile von der anderen Anlage. Man kann sich eine Linie zwischen den beiden Messreihen denken, so dass alle Werte oberhalb der Linie zur einen Gruppe und alle Werte unterhalb zur anderen Gruppe gehören.

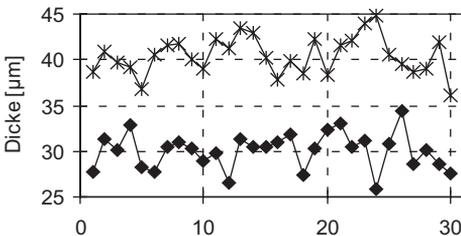


BILD 1-2

Zwei Messreihen mit Mittelwerten von $30\ \mu\text{m}$ bzw. $40\ \mu\text{m}$ und Standardabweichung von $2\ \mu\text{m}$

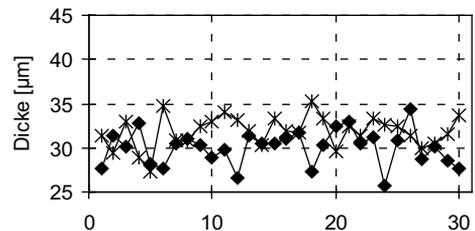


BILD 1-3

Zwei Messreihen mit Mittelwerten von $30\ \mu\text{m}$ bzw. $32\ \mu\text{m}$ und Standardabweichung von $2\ \mu\text{m}$

Häufig liegt jedoch eine Situation wie in Bild 1-3 vor. Es zeigt zwei Messreihen mit Mittelwerten von $30\ \mu\text{m}$ bzw. $32\ \mu\text{m}$ und Standardabweichungen von jeweils $2\ \mu\text{m}$ (d. h. die Mittelwerte unterscheiden sich gerade um eine Standardabweichung). In Bild 1-3 ist der Unterschied zwischen den Anlagen nicht sofort erkennbar. Dies ist kein Problem, wenn der

¹ Hier soll nur das Prinzip erläutert werden, Einzelheiten siehe Kapitel 6.

kleine Unterschied keine Auswirkungen auf die Produkteigenschaften hat. Ist der Unterschied von $2\ \mu\text{m}$ jedoch relevant, so kommt man ohne den Einsatz statistischer Methoden leicht zum falschen Ergebnis.

Statistische Verfahren basieren auf zwei Prinzipien:

1. Man sichert sich gegen Fehlentscheidungen ab. Zwei Versuchsergebnisse werden nur dann als unterschiedlich akzeptiert, wenn der beobachtete Unterschied so groß ist, dass er nur mit ausreichend kleiner Wahrscheinlichkeit zufällig auftritt, obwohl in Wirklichkeit kein Unterschied besteht. So ermöglicht Statistik rationale Entscheidungen trotz Zufallsstreuung.
2. Der Mittelwert von mehreren Messungen streut weniger als die Einzelwerte, weil zufällige Abweichungen sich teilweise kompensieren. Je größer die Anzahl der Einzelwerte ist, desto kleiner ist die Streuung ihres Mittelwerts. Bild 1-4 zeigt als Beispiel das Verhalten der Mittelwerte von je 30 Werten, die einzeln streuen wie in Bild 1-3. Bei den Mittelwerten ist der Unterschied zwischen den Anlagen deutlich erkennbar.

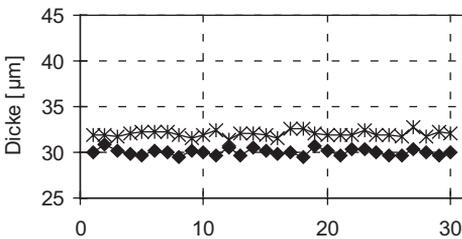


BILD 1-4
Mittelwerte von je 30 Einzelwerten,
sonst wie Bild 1-3

Statistische Verfahren sind erforderlich,

- wenn bei den Versuchen Unterschiede zwischen Prozess- bzw. Produktvarianten erkannt werden sollen, die kleiner sind als ca. das Fünffache der Standardabweichung der Zufallsstreuung (d. h. kleiner als in Bild 1-2), oder
- wenn Unterschiede quantitativ ermittelt werden sollen, d. h. wenn man z. B. in Bild 1-2 angeben möchte, in welchem Bereich der wahre Unterschied zwischen den Schichtdicken mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegt.

Je kleinere Unterschiede man noch erkennen möchte bzw. je genauer man diese Unterschiede bestimmen möchte, desto größer ist der erforderliche Versuchsumfang. Als Daumenregel kann gelten:

Will man einen Unterschied von einer Standardabweichung (d. h. von $2\ \mu\text{m}$ im obigen Beispiel) erkennen, so benötigt man ca. 30 Einzelwerte je Prozess- bzw. Produktvariante (vgl. Bild 1-4).

Begnügt man sich jedoch damit, einen Unterschied von zwei Standardabweichungen (d. h. von $4\ \mu\text{m}$ im obigen Beispiel) zu erkennen, so benötigt man um den Faktor vier weniger Einzelversuche (d. h. ca. 8 je Prozess- bzw. Produktvariante).²

² Hier soll nur ein Gefühl für die Größenordnung des erforderlichen Versuchsumfangs vermittelt werden, Einzelheiten siehe Kapitel 6.

■ 1.3 Warum Versuchsplanung?

Versuche kosten Zeit und Geld, daher soll die Anzahl der Einzelversuche (= Versuchsumfang) möglichst klein sein. Ist der Versuchsumfang jedoch zu klein, so erkennt man relevante Unterschiede oft nicht. Daher bedeutet Versuchsplanung zunächst – wie in Abschnitt 1.2 –, den richtigen Versuchsumfang festzulegen.

So sind z. B. 8 Einzelversuche je Variante erforderlich, wenn man einen Unterschied von zwei Standardabweichungen erkennen möchte. Sollen also z. B. zwei Anlagen mit dieser Genauigkeit verglichen werden, so benötigt man je 8 Einzelversuche bei Anlage 1 und bei Anlage 2 – insgesamt also 16 Einzelversuche.

Oft soll zusätzlich der Einfluss anderer Größen ermittelt werden. Man kann z. B. daran interessiert sein, ob eine Erhöhung der Temperatur von 30 °C auf 50 °C die Schichtdicke verändert.

In solchen Fällen wird häufig der Rat gegeben, immer nur eine der Größen Anlage und Temperatur (man nennt sie Faktoren³) zu verändern (One-factor-at-a-time, links in Bild 1-5). So kann die Ursache für eine Veränderung des Ergebnisses leicht zugeordnet werden. Diese Vorgehensweise hat jedoch eine Reihe von gravierenden Nachteilen:

- Für die gewünschte Genauigkeit benötigt man 8 Einzelversuche je Variante, also insgesamt $3 \times 8 = 24$ Einzelversuche. Mit jedem zusätzlichen Faktor nimmt diese Anzahl um 8 zu. Der Aufwand wird schnell sehr groß.
- Trotz dieses großen Aufwands erhält man z. B. keine Information über das Verhalten von Anlage 2 bei der Temperatur 50 °C. Hat die Erhöhung der Temperatur bei Anlage 2 den gleichen Effekt wie bei Anlage 1 oder nicht?
- Die Kombination Anlage 1/Temperatur 30 °C hat eine größere Bedeutung als die anderen beiden Kombinationen.

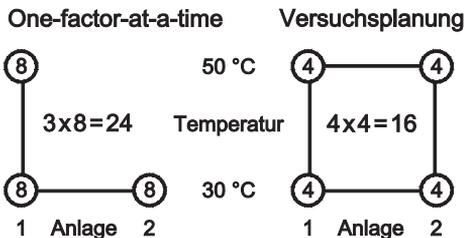


BILD 1-5

Vergleich von One-factor-at-a-time mit Versuchsplanung: Mit Versuchsplanung erhält man mit weniger Einzelversuchen mehr Information.

Die Versuchsplanung dagegen empfiehlt, alle möglichen Kombinationen der Faktoren Anlage und Temperatur zu untersuchen (Bild 1-5 rechts), d. h. zusätzlich die Kombination Anlage 2/Temperatur 50 °C. Auf den ersten Blick sieht das nach mehr Aufwand aus. Und außerdem wurden z. T. beide Größen gleichzeitig verändert. Wie kann man da die Einflüsse trennen?

³ Definition der Begriffe in Kapitel 2.

Eine genauere Betrachtung zeigt jedoch, dass diese Vorgehensweise nur Vorteile hat:

- Insgesamt enthält der Versuchsplan nur $4 \times 4 = 16$ Einzelversuche, im Vergleich zu $3 \times 8 = 24$ bei One-factor-at-a-time. Trotzdem hat man 8 Wertepaare zur Berechnung des Einflusses der Anlage (man spricht vom „Effekt“ der Anlage), nämlich 4 bei 30 °C und 4 bei 50 °C. Und man hat 8 Wertepaare zur Berechnung des Einflusses der Temperatur, nämlich 4 bei Anlage 1 und 4 bei Anlage 2. Die statistische Absicherung ist daher ebenso gut wie bei den 24 Einzelversuchen bei One-factor-at-a-time.
- Man hat auch Versuchsergebnisse bei Anlage 2 und 50 °C und kann so überprüfen, ob der Einfluss der Temperatur von der Anlage abhängt oder nicht.
- Der Versuchsplan ist ausgewogen, keine Kombination hat eine größere Bedeutung als die anderen.

Auf diese Weise erhält man mit weniger Einzelversuchen mehr Information. Das Geheimnis des Erfolgs liegt in der Ausgewogenheit des Versuchsplans rechts in Bild 1-5. Sie erlaubt es, jedes Versuchsergebnis für die Berechnung des Effekts der Anlage **und** des Effekts der Temperatur zu benutzen. Jedes Ergebnis wird somit mehrfach genutzt. Daraus resultiert dann die Einsparung.

Bei mehr als zwei Faktoren ist die Einsparung durch Versuchsplanung noch größer. Bei 4 Faktoren genügen z. B. immer noch nur 16 Einzelversuche, während bei One-factor-at-a-time $(4 + 1) \times 8 = 40$ Einzelversuche erforderlich sind.

Beim praktischen Einsatz der Versuchsplanung ergeben sich noch weitere Vorteile:

- Weil die Faktoren gleichzeitig verändert werden, muss bereits am Anfang festgelegt werden, was untersucht werden soll. Dies erzwingt eine systematische Vorgehensweise, ausgehend vom Untersuchungsziel. „Einfach einmal probieren“ wird vermieden.
- Da der Aufwand von Anfang an besser abgeschätzt werden kann, ist eine verbesserte Kosten-Nutzen-Analyse bereits vor der Versuchsdurchführung möglich. Es wird vermieden, dass immer wieder „nur noch ein Versuch“ durchgeführt wird und damit letztlich der Kosten- und Zeitrahmen überschritten wird.
- Die systematische Darstellung der Ergebnisse erlaubt eine bessere Ableitung von Maßnahmen aus den Ergebnissen – und nur Verbesserungsmaßnahmen rechtfertigen den Aufwand für eine Untersuchung.
- Die systematische Darstellung erleichtert die Dokumentation der Ergebnisse und damit die Übertragung der Erfahrungen auf zukünftige Entwicklungen und andere Benutzer (z. B. Urlaubsvertretung, Nachfolger).

Typische Anwender berichten (vgl. z. B. [1]) eine

- Verkürzung von Projektlaufzeiten um 40 – 75 % und
- Senkung der Versuchskosten um 40 – 75 %.

■ 1.4 Welche Art von Ergebnissen kann man erwarten?

Als Ergebnis der Versuchsplanung und der anschließenden Auswertung erhält man ein empirisches Modell, das den Zusammenhang zwischen den untersuchten Faktoren (z. B. Prozessparametern) und den Zielgrößen (z. B. Schichtdicke, Ausbeute, Messwerten für Produktmerkmale) quantitativ beschreibt.

Da es sich um ein empirisches Modell handelt, dessen mathematische Form vorgegeben werden muss, beschreibt es den experimentell ermittelten Zusammenhang

- nur im untersuchten Bereich, d. h. eine Extrapolation ist nicht zulässig,
- nur im Rahmen der Möglichkeiten der vorgegebenen Form und
- nur unter Berücksichtigung der Zufallsstreuung.

Trotz dieser Einschränkungen sind die Ergebnisse sehr wertvoll für die Produkt- bzw. Prozessoptimierung. Bild 1-6 zeigt als Beispiel ein Teilergebnis einer Untersuchung zum Laserschneiden von Aluminiumblech. In Kapitel 11 wird dieses Beispiel ausführlich behandelt.

Durch den Laser wird das Aluminium geschmolzen. Druckgas entfernt das geschmolzene Material und führt so zur Trennung. Leider erstarrt ein Teil dieses Materials bereits an der Schnittkante wieder und bildet dort einen Grat oder Bart (Verletzungsrisiko). Ziel ist ein bartfreier Schnitt und gleichzeitig eine möglichst geringe Oberflächenrauheit. Dazu wurden u. a. die Prozessparameter (= Faktoren) Laserleistung und Schneidgeschwindigkeit im Rahmen eines Versuchsplans verändert. Für jede Kombination von Prozessparametern im Versuchsplan wurden die mittlere Barthöhe und Oberflächenrauheit gemessen. An die Ergebnisse wurde ein quadratisches Modell angepasst.

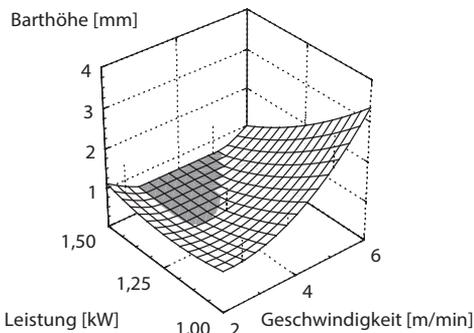


BILD 1-6
Beispiel für Teilergebnis (Wirkungsfläche)

Bild 1-6 zeigt die Abhängigkeit der Barthöhe von Laserleistung und Schneidgeschwindigkeit in diesem Modell, wenn die anderen Prozessparameter festgehalten werden. Man erkennt sofort, dass eine hohe Laserleistung (1,5 kW ist die Maximalleistung des verwendeten Lasers) und eine mittlere Schneidgeschwindigkeit bezüglich der Barthöhe günstig sind. Im dunkler markierten Bereich tritt kein Bart auf. Mit abnehmender Laserleistung nimmt die optimale Schneidgeschwindigkeit ab.

Ähnliche Darstellungen erhält man natürlich auch für die Abhängigkeit der Barthöhe von den anderen Prozessparametern und für die Abhängigkeit der Rauheit von den Prozessparametern. Aus solchen Darstellungen kann man erkennen,

- welche Werte der Prozessparameter besonders günstig für die verschiedenen Zielgrößen sind,
- welche Kompromisse zwischen evtl. widersprüchlichen Anforderungen aus den verschiedenen Zielgrößen nötig bzw. möglich sind, und
- in welche Richtung evtl. noch weitere Verbesserungen möglich sind (in diesem Beispiel könnte man sich überlegen, ob es sich lohnt, einen Laser mit höherer Leistung einzusetzen).

Im Beispiel von Bild 1-6 war das Hauptziel, die Abhängigkeit der Zielgrößen Barthöhe und Rauheit von den Prozessparametern quantitativ (empirisch) zu erfassen. Aus dieser quantitativen Beschreibung der Abhängigkeit lassen sich dann Verbesserungsmaßnahmen für den Prozess ableiten. Für diese Art von Fragestellung sind die sogenannten **klassischen Methoden** der Versuchsplanung besonders geeignet.

Häufig ist das Hauptziel eine möglichst geringe Abhängigkeit von Störgrößen. Im Fall eines Fertigungsprozesses kann dies z. B. bedeuten, dass das Prozessergebnis möglichst wenig von Schwankungen der Prozessparameter, der Umgebungsbedingungen oder des Ausgangsmaterials beeinflusst wird. Im Fall eines Produktes kann dies auch eine möglichst geringe Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen (z. B. Versorgungsspannung und Umgebungstemperatur bei einer elektronischen Schaltung) sein. Man spricht dann von robusten Prozessen bzw. Produkten. Für diese Fragestellung sind die **Methoden nach G. Taguchi** besonders geeignet.

In wieder anderen Fällen möchte man mit möglichst einfachen Mitteln und geringem Aufwand die wichtigsten Größen identifizieren, die die Streuung verursachen. Für diese Fragestellung sind (zumindest als Ansatzpunkt) die **Methoden nach D. Shainin** besonders geeignet.

Insgesamt betrachtet ist Versuchsplanung eine Sammlung von Ideen und Verfahren zur systematischen Verbesserung. Versuchsplanung ist ein Werkzeugkasten – einzelne Werkzeuge sind nicht besser oder schlechter als andere, sondern mehr oder weniger gut für die Lösung bestimmter Aufgaben geeignet. Ziel dieses Buches ist es, die Werkzeuge zu beschreiben und bei der Auswahl des jeweils geeigneten Werkzeugs zu helfen. Häufig ist es sinnvoll, verschiedene Werkzeuge nacheinander zu verwenden.

■ 1.5 Versuche oder systematische Beobachtung?

Geplante Versuche sind immer mit Aufwand verbunden. Daher stellt sich manchmal die Frage, ob es nicht ausreicht, die Fertigung eines Produktes systematisch zu beobachten und Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge aus der gemeinsamen Veränderung von Prozessparametern und Ergebnissen (Korrelation) zu erkennen.

Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass eine solche Korrelation viele Ursachen haben kann und kein Beweis für einen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang ist.



Beispiel

Bei einer chemischen Reaktion ist ein Ausgangsstoff manchmal verunreinigt. Die Verunreinigung führt einerseits zu einer Verringerung der Ausbeute, andererseits zu Schaumbildung. Um die Schaumbildung zu unterdrücken, wird dann der Druck erhöht.

Trägt man nun die Ausbeute gegen den Prozessparameter Druck auf, so ist bei hohem Druck immer die Ausbeute schlecht – man beobachtet eine deutliche Korrelation zwischen Druck und Ausbeute. Es besteht jedoch kein Ursache-Wirkungs-Zusammenhang. Vielmehr ist die Verunreinigung die gemeinsame Ursache für den hohen Druck und die schlechte Ausbeute.

Bei geplanten Versuchen werden die Prozessparameter gezielt verändert. Wenn die Änderung der Ergebnisse (Zielgrößen) durch die Änderung der Prozessparameter an- und wieder abgeschaltet werden kann, ist der Ursache-Wirkungs-Zusammenhang dadurch nachgewiesen. Allerdings kann nur der Effekt derjenigen Prozessparameter (Faktoren) erkannt werden, die im Versuchsplan enthalten sind.

Daraus resultiert folgende Arbeitsteilung:

- Systematische Beobachtung gibt – neben Expertenwissen, Erfahrung, u. ä. – Hinweise auf vermutlich wichtige Einflussgrößen (vgl. Kapitel 4 und 10),
- die dann als Faktoren in geplante Versuche aufgenommen werden (vgl. z.B. Kapitel 3, 5, 7).

■ 1.6 Versuchsplanung und Six-Sigma-Strategie

In den letzten Jahren gewann die Six-Sigma-Strategie weite Verbreitung als einheitlicher Ansatz zur Beurteilung und Verbesserung aller Prozesse in einem Unternehmen (z.B. [2 – 4]). Eine Prozessverbesserung nach der Six-Sigma-Strategie besteht aus den fünf Phasen DMAIC:

- Definieren (**D**efine):
Kunden und seine Anforderungen identifizieren, den zu verbessernden Prozess beschreiben und das Verbesserungsziel festlegen
- Messen (**M**easure):
Messgrößen zur Beurteilung des Prozessergebnisses (Zielgrößen) festlegen, Messmittelfähigkeit und Prozessfähigkeit (σ -Niveau) bestimmen
- Analysieren (**A**nalyse):
Systematische Beobachtung des Prozesses, Datensammlung und Suche nach Zusammenhängen zwischen Prozessparametern (Inputs) und Zielgrößen (Outputs)
- Verbessern (**I**mprove):
Versuchsplanung und -auswertung, um Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Zielgrößen quantitativ zu bestimmen und daraus Verbesserungen abzuleiten

- Regeln (Control):
Prozessregelung, um die erreichte Verbesserung auf Dauer beizubehalten.

Dieses Buch über Versuchsplanung behandelt Methoden für die Schritte „Analyse“ (Kapitel 4 und 10) und „Improve“ (ab Kapitel 5), die Vorbereitungsphasen „Define“ und „Measure“ werden in Kapitel 3 angesprochen, „Control“ wird hier nicht behandelt.

Während der Schwerpunkt der Six-Sigma-Literatur auf den organisatorischen und strategischen Aspekten liegt, wird hier die praktische Anwendung der Versuchsplanung als Weg zur Prozessverbesserung beschrieben.

Literatur

- [1] *Barker, T.B.*: Quality by Experimental Design. Marcel Dekker, New York 1985
- [2] *Magnusson, K./Kroslid, D./Bergman, B.*: Six Sigma umsetzen. Hanser Verlag, München 2. Auflage 2003
- [3] *Melzer, A.*: Six Sigma – kompakt und praxisnah. Springer Gabler, Wiesbaden 2. Auflage 2019
- [4] *Wappis, J./Jung, B.*: Null-Fehler-Management: Umsetzung von Six Sigma. Hanser Verlag, München 6. Auflage 2019

2

Ausgewählte Begriffe

Dieses Kapitel erläutert einige Begriffe und ihre Anwendung in der Versuchsplanung.

Um die Begriffe möglichst anschaulich erläutern zu können, wird zunächst je ein Beispiel aus der Produktentwicklung und aus der Prozessentwicklung bzw. Fertigung beschrieben.



1. Optimierung einer Pumpenkonstruktion

Ausgehend von einer vorhandenen Pumpenkonstruktion soll eine ähnliche Pumpe mit um mindestens 2% verbessertem Wirkungsgrad und 10% niedrigeren Herstellungskosten entwickelt werden. Das Saugvermögen soll möglichst nahe bei einem vorgegebenen Wert liegen.

Um den Einfluss verschiedener Konstruktionsparameter wie Gehäuse-, Steuerscheiben- und Schaufelradgeometrie zu untersuchen, werden diese in einem Versuch systematisch verändert. Für jede untersuchte Kombination von Konstruktionsparametern werden Saugvermögen und Wirkungsgrad der Pumpe gemessen. Die erwarteten Herstellungskosten werden von der Fertigungsabteilung geschätzt.

2. Optimierung eines chemischen Abscheideprozesses

Bei der Fertigung von integrierten Bauelementen (ICs) werden viele Schichten chemisch abgeschieden. Dazu werden z.B. 100 hintereinander aufgestellte Halbleiterscheiben gleichzeitig in einem Rohröfen auf hohe Temperatur erhitzt, durch den ein Gemisch aus Trägergas und verschiedenen Reaktionsgasen gepumpt wird. Bei der hohen Temperatur im Rohröfen zersetzen sich die Reaktionsgase. Zersetzungsprodukte scheiden sich auf den Scheiben ab, und eine Schicht wächst auf.

Ziel ist es, bei möglichst hoher Abscheiderate eine qualitativ hochwertige Schicht zu erhalten, deren Dicke nur geringfügig von der Position auf der Scheibe (Mitte oder Rand) und der Position der Scheibe im Ofen (vorne – mitten – hinten, in Strömungsrichtung der Reaktionsgase gesehen) abhängt.

Bei den Versuchen werden die Temperatur im Ofen (in verschiedenen Heizzonen), der Druck und die Durchflussmengen verschiedener Reaktionsgase verändert. Gemessen wird jeweils die Dielektrizitätskonstante der abgeschiedenen Schicht (sie gibt Aufschluss über die Qualität der Schicht) und die Dicke der Schicht in der Mitte und am Rand auf mehreren Scheiben, die an definierten Stellen im Ofen standen.

■ 2.1 Zielgrößen

Zielgrößen beschreiben das Ergebnis eines Versuchs. Zielgrößen können Messwerte sein, aber auch Größen, die aus einem oder mehreren Messwerten errechnet werden. Bei einem Versuch können mehrere Zielgrößen bestimmt werden.



1. Zielgrößen im Pumpenbeispiel

Wirkungsgrad, Saugvermögen und Herstellungskosten.

Das Saugvermögen wird direkt gemessen. Der Wirkungsgrad wird aus Messwerten wie Leistungsaufnahme, Förderhöhe u. ä., die Herstellungskosten werden aus Teilekosten und Montageaufwand berechnet.

2. Zielgrößen im Abscheidebeispiel

Dielektrizitätskonstante (als Indikator für die Qualität), mittlere Abscheiderate und Streuung der Abscheiderate (z. B. die Differenz zwischen Mitte und Rand auf einer Scheibe, die Differenz zwischen Scheiben von verschiedenen Positionen im Ofen).

Die Dielektrizitätskonstante wird direkt gemessen. Die Abscheiderate wird aus der Schichtdicke und der Abscheidezeit berechnet. Mittlere Abscheiderate und Streuung der Abscheiderate werden jeweils aus mehreren Messwerten berechnet.

■ 2.2 Einflussgrößen

Einflussgrößen sind Größen, die die Versuchsergebnisse (Zielgrößen) möglicherweise beeinflussen.

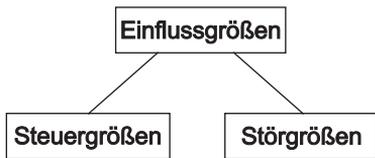


1. Einflussgrößen im Pumpenbeispiel

Die verschiedenen Konstruktionsparameter wie Gehäuse-, Steuerscheiben- und Schaufelradgeometrie, die im Versuch verändert werden, aber auch weitere Konstruktionsparameter, die das Ergebnis ebenfalls beeinflussen würden. Außerdem können z. B. auch Einsatzbedingungen oder Montagebedingungen Einflussgrößen sein.

2. Einflussgrößen im Abscheidebeispiel

Die Temperatur im Ofen (in verschiedenen Heizzonen), der Druck und die Durchflussmengen verschiedener Reaktionsgase, aber auch die Position auf der Scheibe, die Position der Scheibe im Ofen, Umgebungsbedingungen, die chemische Zusammensetzung der Reaktionsgase, das Trägergas, die Hersteller der Gase und der Scheiben usw.

**BILD 2-1**

Einflussgrößen werden von G. Taguchi in Steuergrößen und Störgrößen unterteilt

■ 2.3 Steuergrößen

Steuergrößen sind Einflussgrößen, deren Wert für das Produkt bzw. den Fertigungsprozess auf einen bestimmten Wert eingestellt und dort (in gewissen Grenzen) gehalten werden kann (Konstruktions- bzw. Prozessparameter, Bild 2-1).



1. Steuergrößen im Pumpenbeispiel

Die verschiedenen Konstruktionsparameter wie Gehäuse-, Steuerscheiben- und Schaufelradgeometrie, die im Versuch verändert werden, aber auch weitere Konstruktionsparameter, die das Ergebnis ebenfalls beeinflussen würden. Aufgabe der Entwicklung ist es, geeignete Werte für die Steuergrößen festzulegen.

2. Steuergrößen im Abscheidebeispiel

Prozessparameter, wie die Temperatur im Ofen (in verschiedenen Heizzonen), der Druck und die Durchflussmengen verschiedener Reaktionsgase, die chemische Zusammensetzung der Reaktionsgase, das Trägergas usw. Für die Fertigung werden geeignete Werte für die Steuergrößen festgelegt.

■ 2.4 Störgrößen

Störgrößen sind Einflussgrößen, deren Wert für das Produkt bzw. den Fertigungsprozess nicht vorgegeben werden kann (oder z.B. aus Kostengründen nicht vorgegeben werden soll, Bild 2-1).



1. Störgrößen im Pumpenbeispiel

Einsatzbedingungen beim Kunden (z.B. Umgebungstemperatur, Führung der Saug- und Druckleitung) oder Montagebedingungen, die nicht vorgegeben werden können; aber auch die zufällige Abweichung eines Konstruktionsparameters von seinem Sollwert (innerhalb der Spezifikation) wirkt wie eine Störgröße.

2. Störgrößen im Abscheidebeispiel

Die Position auf der Scheibe, die Position der Scheibe im Ofen, Umgebungsbedingungen; aber auch die zufällige Abweichung eines Prozessparameters wie der Temperatur von seinem Sollwert wirkt wie eine Störgröße.

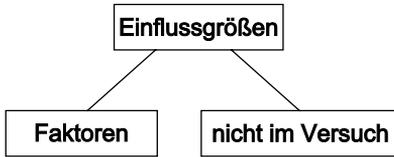


BILD 2-2

Einflussgrößen, die für den Versuch ausgewählt werden, heißen Faktoren

■ 2.5 Faktoren

Aus der Vielzahl der Einflussgrößen werden für den Versuch die vermuteten wesentlichen Einflussgrößen ausgewählt. Diese für den Versuch ausgewählten Einflussgrößen heißen Faktoren (Bild 2-2).



1. Faktoren im Pumpenbeispiel

Die verschiedenen Konstruktionsparameter wie Gehäuse-, Steuerscheiben- und Schaufelradgeometrie, die im Versuch verändert werden.

2. Faktoren im Abscheidebeispiel

Die Temperatur im Ofen (in verschiedenen Heizzonen), der Druck und die Durchflussmengen verschiedener Reaktionsgase. Die Position auf der Scheibe und die Position der Scheibe im Ofen können je nach Auswertung ebenfalls als Faktoren betrachtet werden.

Hinweis: Für den Versuch ausgewählte Steuergrößen heißen Steuerfaktoren. In einem Versuch können auch Störgrößen als Faktoren verändert werden, sie heißen Rauschfaktoren. Ziel des Versuchs ist es dann, Einstellungen der Steuerfaktoren zu finden, bei denen sich die Rauschfaktoren möglichst wenig auswirken.

■ 2.6 Faktorstufen

Nach der Auswahl der Faktoren muss festgelegt werden, welche Werte die Faktoren im Versuch annehmen sollen. Diese ausgewählten Werte werden als Stufen bezeichnet.



1. Faktorstufen im Pumpenbeispiel

Das Gehäuse kann im Versuch z. B. an einer bestimmten Stelle eine Nut haben oder nicht, die Stufen für den Faktor „Gehäusenut“ sind dann „mit Nut“ und „ohne Nut“.

Ähnlich müssen für alle Faktoren mindestens zwei Stufen festgelegt werden.

2. Faktorstufen im Abscheidebeispiel

Die Temperatur kann z. B. die Stufen 700 °C und 720 °C haben, d. h. ein Teil (normalerweise die Hälfte) der Versuche wird bei 700 °C, der Rest bei 720 °C durchgeführt.

Der Druck kann z. B. die Stufen 130 mbar und 160 mbar haben usw.

■ 2.7 Quantitative und qualitative Faktoren

Je nach Art der Faktorstufen wird zwischen quantitativen (= numerischen) und qualitativen (= kategorischen) Faktoren unterschieden. Bei quantitativen Faktoren werden die Stufen mit Zahlenwerten auf einer Messskala beschrieben, bei qualitativen Faktoren gibt es keine Skala, nur Namen, Beschreibungen oder Bezeichnungen. Bei quantitativen Faktoren gibt es – im Gegensatz zu qualitativen Faktoren – zumindest im Prinzip auch Zwischenwerte und es ist sinnvoll, Ergebnisse zu interpolieren.



1. Pumpenbeispiel

„Gehäusenut“ mit den Stufen „mit Nut“ und „ohne Nut“ ist ein Beispiel für einen qualitativen Faktor. Der Abstand zwischen Gehäuse und Schaufelrad und andere geometrische Dimensionen sind quantitative Faktoren.

2. Abscheidebeispiel

Temperatur und Druck sind Beispiele für quantitative Faktoren. Die Position auf der Scheibe (Mitte – Rand) oder der Scheibe im Ofen (vorne – mitte – hinten) sind qualitative Faktoren, wenn sie so angegeben werden, als Abstand von der Mitte oder als Nummer der Scheibe im Ofen sind sie quantitativ. Werden mehrere Öfen verwendet, so ist der Ofen ein qualitativer Faktor mit den Stufen Ofen 1, Ofen 2, Ofen 3 usw. (im Gegensatz zur Nummer der Scheibe im Ofen enthält die Nummer des Ofens keine inhaltliche, sondern nur organisatorische Information – es ist nicht sinnvoll, zwischen Ofen 1 und Ofen 3 zu interpolieren).

3

Vorgehensweise im Überblick

In diesem Kapitel werden die Einzelschritte beschrieben, aus denen ein geplanter Versuch besteht (siehe auch [1 – 4]). Der Schwerpunkt liegt hier auf der Vorbereitung und Nachbereitung. Die eigentliche Versuchsplanung und die Auswertung der Ergebnisse werden später im Detail beschrieben.

Ein wesentlicher Aspekt der Versuchsplanung ist, dass bereits in der Planungsphase alle Betroffenen mit eingebunden werden. Soll z. B. die Entwicklungsabteilung eine Untersuchung zu einem neuen Produkt durchführen, so müssen die Anforderungen (Untersuchungsziele) mit dem Marketing abgestimmt sein, damit das Produkt die Wünsche der Kunden erfüllt, und mit der Fertigung, damit das Produkt kostengünstig gefertigt werden kann. Die beteiligten Mitarbeiter aus den betroffenen Bereichen müssen zwar keine Versuchsplanung im Detail durchführen können, sollen jedoch einen Überblick über Vorgehensweise und Möglichkeiten der Versuchsplanung haben. Dann können sie besser zur Definition der Untersuchungsziele beitragen.

Ziel dieses Kapitels ist es, den so von der Untersuchung Betroffenen genügend Information zu geben, dass sie gezielt zur Vorbereitung, insbesondere zur Definition der Untersuchungsziele, beitragen können.

■ 3.1 Ausgangssituation beschreiben

Zur Vorbereitung einer Untersuchung gehört, dass man sich zunächst Rechenschaft ablegt über das Umfeld. Dazu gehören folgende Fragen:

- Wer ist der Kunde?
Für wen wird die Untersuchung gemacht? Was stört ihn? Was braucht er? Was ist ihm eine Verbesserung wert? Die Kundenorientierung hilft bei der Formulierung der Ziele und beim Setzen von Prioritäten. Der Kunde kann extern oder firmenintern sein.
- Was ist die langfristige Zielsetzung?
Jede Untersuchung kostet Zeit und Geld. Sie ist daher nur zu verantworten, wenn sie einen entsprechenden Nutzen bringt. Um den Nutzen einer Untersuchung beurteilen zu können, muss sie in eine Gesamtstrategie eingeordnet sein.
- Welches (Teil-)Problem soll durch die jetzt geplante Untersuchung gelöst werden?
Insbesondere bei komplexen Problemen ist es sinnvoll, sie in überschaubare Teile zu zerlegen und in mehreren Schritten vorzugehen. So kann das Ergebnis des einen Schritt