



Inhalt

Vorwort	V
Inhalt	VII
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 Reflowlötens	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	Weitere Screening-Versuchspläne*	160
8.5	Funktionstest*	161
8.6	Einsatzempfehlungen	163
9	Robuste Produkte/Prozesse	165
9.1	Ziel und Strategie von G. Taguchi	166
9.1.1	Qualitätsziel: Streuung minimieren	166
9.1.2	Entwicklungsstrategie: Robuste Produkte/Prozesse	166
9.2	Taguchis Versuchspläne und ihre Auswertung	168
9.3	Alternative Ansätze	176
9.3.1	Aus der Differenz von Messwerten abgeleitete Zielgrößen	176
9.3.2	Wechselwirkung zwischen Steuer- und Rauschfaktoren	177
9.4	Anmerkungen zu den „Orthogonalen Feldern“ u. ä.*	178
9.4.1	Orthogonale Felder	178
9.4.2	Lineare Graphen und Dreieckstabellen	179
9.4.3	Dummy Levels, Pseudo Factor Designs, Idle Columns	180

10 Regressionsanalyse	183
10.1 Einfache lineare Regression	184
10.1.1 Methode der kleinsten Quadrate	184
10.1.2 Bestimmtheitsmaß und Korrelationskoeffizient	186
10.1.3 Grafische Beurteilung der Residuen	189
10.1.4 Vertrauensbereiche und Signifikanz	192
10.1.5 Zusammenhang lineare Regression – Mittelwertvergleich	197
10.1.6 Quasilineare Regression	198
10.2 Mehrfache Regression	198
10.2.1 Zweifache lineare Regression	199
10.2.2 Transformierte Einflussgrößen	202
10.2.3 Prinzip der schrittweisen Regression	205
10.2.4 Beurteilung des Regressionsmodells	206
11 Versuchspläne für nichtlineare Zusammenhänge	209
11.1 Zentral zusammengesetzte Versuchspläne	209
11.1.1 Orthogonaler Versuchsplan	211
11.1.2 Technisch bedingte Abweichungen vom Versuchsplan	212
11.1.3 Bekannte nichtlineare Abhängigkeiten	213
11.1.4 Varianten von zentral zusammengesetzten Plänen	213
11.1.5 Praxisbeispiel Laserschneiden	216
11.2 Alternative Pläne*	224
11.2.1 3^k - und 3^{k-p} -Pläne	224
11.2.2 Box-Behnken-Pläne	224
11.2.3 Kleine zusammengesetzte Pläne	225
11.2.4 Optimale Pläne	227
11.3 Grenzen des quadratischen Modells	228
11.3.1 Beispiele und Lösungsmöglichkeiten	229
11.3.2 Allgemeine Lösungsansätze	231
11.4 Einsatzempfehlungen	232
12 Varianzanalyse	235
12.1 Einfache balancierte Varianzanalyse	236
12.2 Mehrfache Varianzanalyse	241
12.3 Feste und zufällige Effekte*	244
12.4 Nicht vollständige Randomisierung*	246
12.4.1 Alle Realisierungen einer Kombination gemeinsam	246
12.4.2 Split-Plot Versuche	247
13 Screening für mehrstufige Faktoren*	249
13.1 Versuchspläne	249
13.2 Auswertung	250
13.3 Einsatzempfehlungen	252

14 Versuchspläne für Mischungen*	253
14.1 Mischungspläne ohne Begrenzungen	254
14.2 Auswertung von Mischungsplänen	256
14.3 Mischungspläne mit Begrenzungen	256
14.4 Kombinierte Versuchspläne	257
15 Spezielle Zielgrößen*	259
15.1 Gut-Schlecht-Ergebnisse	259
15.1.1 Möglichkeiten zur Vermeidung	259
15.1.2 Auswertung	261
15.2 Anzahl Fehler	265
15.3 Mehrere Zielgrößen	266
16 Erweiterung von Versuchsplänen*	273
16.1 Trennung vermengter Wechselwirkungen	273
16.2 Zentrumspunkt	275
16.3 Zuordnung quadratischer Effekte	277
16.4 Nicht realisierbare Faktorstufenkombinationen	279
17 Alternative Modellierungsansätze*	283
17.1 Andere Verteilungen: Maximum Likelihood Prinzip	283
17.2 Robuste Regression	284
17.3 Andere Modellansätze	284
17.3.1 Überanpassung und Unteranpassung	284
17.3.2 Lokale Modelle	286
17.3.3 Neuronale Netze	287
17.3.4 Gaussian Process Models	287
17.3.5 Einsatzempfehlungen	288
18 Sequentielle Optimierungsverfahren*	291
18.1 Evolutionary Operations (EVOP)	292
18.2 Methode des steilsten Anstiegs	294
18.3 Simplexverfahren	295
18.4 Neuere Entwicklungen	297
19 Software*	301
19.1 Allgemeine Hinweise	301
19.2 Beschreibung ausgewählter Programme	302
19.3 Spezielle Anwendungsgebiete	308
20 Beispiele*	311
20.1 Beispiel Motoroptimierung	311
20.2 Literaturbeispiele	316
20.3 Übungsbeispiele	317
20.3.1 Papier-Rotor	317
20.3.2 Nürnberger Trichter	320

Anhang	323
Anhang A - Abkürzungen und Formelzeichen	323
Anhang B - Statistische Tabellen	324
Anhang C - Wegweiser durch die Verfahren	326
Anhang D - Ablauf einer Versuchsplanung	327
Anhang E - Ablauf einer Datenauswertung	328
Anhang F - Glossar deutsch/englisch	329
Anhang G - JAVA-Applets auf der DVD	333
Anhang H - Software/Beispiele auf der DVD	337
Anhang J - Software/Demos im Internet	339
Index	343

* Für das Verständnis der folgenden Kapitel nicht erforderlich