

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grundlagen</b>	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Grundbegriffe	2
1.2.1	Systemgrenzen	3
1.2.2	Qualitätsmerkmal	4
1.2.3	Parameter und Faktoren	5
1.2.4	Stufen	6
1.2.5	Vergleich zu traditionellen Verfahren	6
1.3	Auswertung	9
1.3.1	Fallstudie	9
1.3.2	Effekt	12
1.3.3	Wechselwirkung	15
1.3.4	Lineares Beschreibungsmodell	21
	Literaturverzeichnis	25
<b>2</b>	<b>Versuchspläne</b>	27
2.1	Einleitung	27
2.2	Screening Versuchspläne	28
2.2.1	Konzept	28
2.2.2	Reguläre Felder nach dem Yates-Standard	32
2.2.3	Irreguläre Felder nach Plackett-Burman	33
2.2.4	Fallstudie	35
2.3	Versuchspläne für ein quadratisches Beschreibungsmodell	39
2.3.1	Central-Composite-Design	40
2.3.2	Box-Behnken-Design	42
2.3.3	Monte-Carlo-Verfahren	44
2.3.4	Fallstudie	45
2.4	Grenzen des Beschreibungsmodells	48
2.5	Mischungspläne	52
2.5.1	Simplex-Lattice-Design	52

2.5.2	Simplex-Centroid-Design	53
2.6	Individuell erstellte Versuchspläne	54
2.6.1	Auswahlkriterien	55
2.6.2	Einschränkungen des Faktorraums	57
2.7	Die Mutter aller Versuchspläne	57
	Literaturverzeichnis	59
<b>3</b>	<b>Kontrollverfahren</b>	<b>61</b>
3.1	Einleitung	61
3.2	Versuchsplan	62
3.2.1	Fallbeispiel	63
3.2.2	Korrelationsmatrix	64
3.2.3	Varianz-Inflations-Faktor (VIF)	65
3.2.4	Fraction of Design Space (FDS)	65
3.2.5	Hebelwerte	66
3.3	Beschreibungsmodell	68
3.3.1	Half-Normal-Plot	68
3.3.2	Varianzanalyse	73
3.4	Genauigkeit der Vorhersage	77
3.4.1	Fallbeispiel	77
3.4.2	Residual-Plots	78
3.4.3	Löschdiagnosen	81
3.4.4	Box-Cox Transformation	83
3.4.5	Bestätigungsläufe	84
	Literaturverzeichnis	85
<b>4</b>	<b>Statistische Modellbildung</b>	<b>87</b>
4.1	Einleitung	87
4.2	Warum Statistik?	88
4.3	Randomisierung, Wiederholung, Blockbildung	
	— Fishers Brücke in die Statistik	93
4.3.1	Randomisierung	93
4.3.2	Wiederholung	96
4.3.3	Blockbildung	99
4.4	Wieso “Null”hypothese? Der Grundgedanke aller statistischen Tests	101
4.4.1	Ein Beispiel	101
4.4.2	$\alpha$ - und $\beta$ -Risiko	102
4.4.3	Versuchsumfang	106
4.5	“Der” Test für DoE: Fishers Varianzanalyse	111
4.5.1	Varianzzerlegung	111
4.5.2	Die Anova-Tabelle	114
4.5.3	Von der Testgröße zur Wahrscheinlichkeit	117
4.5.4	Auswertung bei Blockbildung	121
4.5.5	Faktorelimination	122
4.5.6	Versuchszahl	128

4.6	Modellvalidierung .....	133
4.7	Zusammenfassung: Von den Daten zum Modell in 7 Schritten .....	136
	Literaturverzeichnis .....	137
<b>5</b>	<b>Varianten der statistischen Versuchsplanung .....</b>	<b>139</b>
5.1	Einleitung .....	139
5.2	Umgang mit mehreren Qualitätsmerkmalen .....	140
5.2.1	Multiple-Response-Optimisation .....	140
5.2.2	Sequentielle Methode und Ersatzgrößen .....	145
5.2.3	Principal Component Analysis .....	146
5.3	Robustes Design .....	147
5.3.1	Parameterdesign .....	147
5.3.2	Toleranzdesign .....	153
5.4	Umgang mit kategorialen Faktoren .....	156
	Literaturverzeichnis .....	158
<b>6</b>	<b>DoE Beispiele .....</b>	<b>159</b>
6.1	Einleitung .....	159
6.2	Die Schutzplanke .....	160
6.2.1	Systembeschreibung und Versuchsplan .....	160
6.2.2	Auswertung der Qualitätsmerkmale .....	163
6.3	Der Ventiltrieb .....	165
6.3.1	Systembeschreibung .....	165
6.3.2	Versuchsplan und Stufenfestlegung .....	167
6.3.3	Auswertung der Qualitätsmerkmale .....	169
6.3.4	Optimierung .....	172
	Literaturverzeichnis .....	177
<b>7</b>	<b>Computer-Experiment .....</b>	<b>179</b>
7.1	Einleitung .....	179
7.2	Aufbau und Analyse von Computer-Experimenten .....	179
7.2.1	Vergleich von Computer- und physikalischem Experiment ..	181
7.2.2	Testfelder für Computer-Experimente .....	182
7.2.3	Metamodelle .....	186
7.2.4	Analyse und Optimierung .....	186
	Literaturverzeichnis .....	188
<b>8</b>	<b>Versuchspläne für komplexe Zusammenhänge .....</b>	<b>189</b>
8.1	Einleitung .....	189
8.2	Gütekriterien für Testfelder .....	190
8.2.1	MiniMax und MaxiMin .....	191
8.2.2	Entropie .....	193
8.2.3	Gleichverteilung ( <i>Uniformity</i> ) .....	194
8.2.4	Vergleich verschiedener Gütekriterien .....	197
8.3	Konstruktionsmethoden gleichverteilter Testfelder .....	198
8.3.1	(Quasi) Monte-Carlo .....	199

8.3.2	Orthogonale Testfelder	204
8.3.3	Latin Hypercube	205
8.3.4	Gleichverteilte Testfelder ( <i>Uniform Designs</i> )	209
8.4	Optimierung von Testfeldern	214
8.5	Ungleichverteilte Testfelder	219
8.6	Faktorbereiche entfernen	220
8.7	Versuchsplanerweiterungen und Voranalyse von Messdaten	222
8.8	Wie viele Messungen soll ich machen?	224
8.9	Zusammenfassung	226
	Literaturverzeichnis	227
<b>9</b>	<b>Metamodelle</b>	<b>231</b>
9.1	Einleitung	231
9.2	Lineare Regression	232
9.3	Polynome	234
9.3.1	Faktorwahl	234
9.4	Robuste Regression	239
9.5	Adaptive Basis-Funktions Konstruktion	241
9.6	Kernel- und Lokale Polynom-Regression	243
9.7	Regressionsbaum	248
9.8	Splines	254
9.9	Support Vector Machines zur Klassifikation	258
9.9.1	Klassifikation linear separierbarer Daten	258
9.9.2	Klassifikation nicht komplett linear separierbarer Daten	262
9.9.3	Nichtlineare Support Vector Machines	264
9.10	Support Vector Regression	266
9.10.1	Regression mit linearer $\varepsilon$ -unempfindlicher Straffunktion	266
9.10.2	$\nu$ -SVR-Verfahren zur automatischen $\varepsilon$ -Bestimmung	269
9.10.3	Regression mit quadratischer $\varepsilon$ -unempfindlicher Straffunktion	270
9.10.4	Least Square Support Vector Regression	272
9.11	Ridge Regression	273
9.12	Kleinster und gewichteter Abstand	275
9.13	Kriging	276
9.13.1	Kriging-Regression verrauschter Daten	281
9.13.2	Universal Kriging	283
9.14	Radial Basis Funktion	284
9.14.1	RBf-Regression verrauschter Daten	285
9.14.2	Polynom Erweiterung	288
9.14.3	Reduzierung der Zentren	289
9.15	Gauß Prozess Modelle	290
9.15.1	Bedingte Verteilung und Randverteilung	291
9.15.2	Vorhersagen mittels bedingter Verteilung	293
9.15.3	Betrachtung im Funktionsraum	294
9.15.4	Kovarianzfunktionen	295

9.15.5 Anpassung der Hyperparameter .....	300
9.16 Künstliche Neuronale Netzwerke .....	302
9.17 Kombinierte Modelle .....	313
9.18 Qualität von Metamodellen .....	314
9.19 Zusammenfassung .....	316
Literaturverzeichnis .....	319
<b>10 Optimierung .....</b>	<b>325</b>
10.1 Einleitung .....	325
10.2 Dominanz .....	326
10.2.1 Priorität und Grenzwert .....	328
10.3 Randbedingungen .....	332
10.4 Reduktion auf eine Zielgröße .....	333
10.5 Naturalanaloge Optimierungsverfahren .....	336
10.5.1 Partikelschwarmoptimierung .....	336
10.5.2 Glühwürmchen .....	340
10.5.3 Fledermaus .....	342
10.5.4 Blütenbestäubung .....	344
10.5.5 Symbiotische Organismus Suche .....	346
10.5.6 Erweiterung auf mehrere Zielgrößen .....	348
10.6 Genetische Evolutionsverfahren für mehrerer Zielgrößen .....	353
10.6.1 Kreuzung .....	355
10.6.2 Mutation .....	357
10.6.3 Exemplarische Verfahren (NSGA-II und $\epsilon$ -MOEA) .....	358
10.7 Qualität multidimensionaler Pareto-Grenzen .....	367
10.7.1 R-Indikatoren .....	368
10.7.2 Hypervolumen .....	374
10.8 Zusammenfassung .....	376
Literaturverzeichnis .....	377
<b>11 Korrelationsanalyse .....</b>	<b>381</b>
11.1 Pearson Korrelation .....	381
11.2 Scheinkorrelation und verdeckte Korrelation .....	383
11.3 Signifikanz einer Korrelation .....	383
11.3.1 Permutationstest .....	384
11.4 Rangkorrelation .....	385
11.4.1 Spearman .....	387
11.4.2 Kendalls $\tau$ .....	388
11.5 Nichtlineare Korrelation .....	389
Literaturverzeichnis .....	394
<b>12 Komponentenanalyse .....</b>	<b>395</b>
12.1 Einleitung .....	395
12.2 Hauptkomponentenanalyse (PCA) .....	396
12.3 Kernel-Hauptkomponentenanalyse (kPCA) .....	400

12.4	Unabhängige Komponenteanalyse (ICA) .....	403
12.4.1	Unabhängigkeit .....	405
12.4.2	Nicht-Normalverteilt .....	406
12.4.3	Datenvorbereitung .....	409
12.4.4	FastICA .....	410
	Literaturverzeichnis .....	413
<b>13</b>	<b>Sensitivitätsanalyse .....</b>	<b>415</b>
13.1	Einleitung .....	415
13.2	Sensitivitätsanalyse bei Linearen Modellen .....	416
13.2.1	Normierte Regressionskoeffizienten .....	416
13.2.2	Partialsumme der Quadrate .....	417
13.2.3	Partieller Determinationskoeffizient .....	418
13.2.4	Predictive Error Sum of Squares .....	418
13.2.5	Partielle Korrelationsfaktoren .....	418
13.3	Sensitivitätsanalyse bei nichtlinearen Modellansätzen .....	419
13.3.1	Korrelationsverhältnis .....	419
13.3.2	Sobol's Kennzahl .....	422
13.3.3	FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test) .....	425
13.4	Zusammenfassung .....	429
	Literaturverzeichnis .....	430
<b>14</b>	<b>Strategie .....</b>	<b>431</b>
14.1	Einleitung .....	431
14.2	Qualitative Systembeschreibung .....	432
14.3	Versuchsdurchführung und Auswertung .....	434
14.4	CAE .....	436
14.5	Software .....	437
<b>15</b>	<b>Strategie für komplexe Systeme .....</b>	<b>441</b>
15.1	Vorbereitung und Planung .....	441
15.2	Versuchsplan erstellen .....	451
15.3	Experiment (Messung und Rechnung) .....	453
15.4	Kontrolle der Daten .....	453
15.5	Erzeugung von Metamodellen .....	454
15.6	Kontrolle der Metamodelle .....	455
15.7	Analyse der Daten und Metamodelle .....	456
15.8	Optimierung .....	457
15.9	Prüfung der Analyse und Optimierungsergebnisse .....	457
15.10	Dokumentation .....	458
15.11	Schlusswort .....	458

<b>A</b>	<b>Berechnungsmodell zum Fallbeispiel Rasensprenger</b>	461
A.1	Nomenklatur	462
A.2	Berechnung	462
A.3	Erweiterungen	466
A.4	Quellcode	468
	Literaturverzeichnis	473
<b>B</b>	<b>Computer-Experiment</b>	475
B.1	Rasensprenger mit erweitertem Faktorraum	475
B.2	Testfelder und Metamodelle	479
B.3	Sensitivitätsanalyse	491
B.4	Optimierung	492
	<b>Nomenklatur</b>	495
	<b>Abkürzungen und Markennamen</b>	499
	<b>Sachverzeichnis</b>	501

Statistische Versuchsplanung

Design of Experiments (DoE)

Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, Th.

2017, XIX, 508 S. 280 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-662-55742-6