

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen	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
2	Versuchspläne	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

- 3 Kontrollverfahren 61**
 - 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 Löschiagnosen 81
 - 3.4.4 Box-Cox Transformation 83
 - 3.4.5 Bestätigungsläufe 84
 - Literaturverzeichnis 85

- 4 Statistische Modellbildung 87**
 - 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 α - und β -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
5	Varianten der statistischen Versuchsplanung	139
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
6	DoE Beispiele	159
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
7	Computer-Experiment	179
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
8	Versuchspläne für komplexe Zusammenhänge	189
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
9	Metamodelle	231
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 ε -unempfindlicher Straffunktion	266
9.10.2	ν -SVR-Verfahren zur automatischen ε -Bestimmung	269
9.10.3	Regression mit quadratischer ε -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
10	Optimierung	325
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 ϵ -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
11	Korrelationsanalyse	381
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 τ	388
11.5	Nichtlineare Korrelation	389
	Literaturverzeichnis	394
12	Komponentenanalyse	395
12.1	Einleitung	395
12.2	Hauptkomponentenanalyse (PCA)	396
12.3	Kernel-Hauptkomponentenanalyse (kPCA)	400

12.4	Unabhängige Komponentenanalyse (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
13	Sensitivitätsanalyse	415
13.1	Einleitung	415
13.2	Sensitivitätsanalyse bei Linearen Modellen	416
13.2.1	Normierte Regressionskoeffizienten	416
13.2.2	Partialsomme 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
14	Strategie	431
14.1	Einleitung	431
14.2	Qualitative Systembeschreibung	432
14.3	Versuchsdurchführung und Auswertung	434
14.4	CAE	436
14.5	Software	437
15	Strategie für komplexe Systeme	441
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

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